

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

Nosná konstrukce pod Yankee válec

The Frame Structure for the Yankee Roller

Student:

Lukáš HERTL

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra aplikované mechaniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Lukáš Hertl

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma:

Nosná konstrukce pod Yankee válec
The Frame Structure for the Yankee Roller

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

- 1/ Proved'te rozbor zatěžovacích stavů
- 2/ Proved'te zjednodušený analytický výpočet
- 3/ Proved'te výpočet pomocí MKP
- 4/ Vyhodno'te výsledky výpočtů

Seznam doporučené odborné literatury:

LENERT, J.: Pružnost a pevnost I, II, Ostrava, skripta VŠB-TU Ostrava.

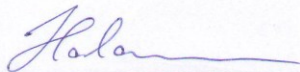
LENERT, J.: Úvod do metody konečných prvků. 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999. 109 s. ISBN 80-7078-686-8.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15. 5. 2017

..... Lukáš Kurf

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

15. 5. 2017

Lukáš Hertl

.....
podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Lukáš Hertl

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Lumírova 54

700 30, Ostrava 3

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HERTL, L. *Nosná konstrukce pod Yankee válec – Bakalářská práce*. OSTRAVA: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2017, 54 s. Vedoucí práce: Ing. Rojíček Jaroslav, Ph.D.

Cílem této bakalářské práce byla statická pevnostní analýza konstrukce pro papírenský Yankee válec. Konstrukce byla kontrolována dvěma metodami. V prvním případě se jednalo o analytickou metodu, kdy došlo ke zjednodušení konstrukce a následnému výpočtu. Druhá metoda byla numerická, kdy došlo ke kontrole konstrukce pomocí MKP (metody konečných prvků). Pro tvorbu modelu a přípravu vstupních dat byl použit software MSC Patran 14.1, pro samotné řešení pak MCS Nastran 14.1. Současně byla úloha zpracována a analyzována softwarem ANSYS Workbench 18.0. V závěru bylo provedeno porovnání výsledků analytické a numerické metody a vyhodnocení konstrukce, zda vyhovuje normě ČSN EN 1993.

ANNOTATION OF THESIS

HERTL, L. *The Frame Structure for the Yankee Roller – Bachelor Thesis*. OSTRAVA: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2017, 54 p. Thesis head: Ing. Rojíček Jaroslav, Ph.D.

The aim of this bachelor thesis was static stress analysis of the frame structure for the Yankee Roller. The construction was tested by two methods. The first method, the analytical one, checked the simplified construction. The second method was numerical. The structure was examined by using the FEM (Finite Element Method). The numerical model was prepared in MSC Patran 14.1 and the solution executed in MSC Nastran 14.1. At the same time, the task was processed and analyzed in software ANSYS Workbench 18.0. In the end, the results of both these methods (analytical and numerical one) were compared and the frame structure was evaluated that structure complied with the ČSN EN 1993 standard.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu **Ing. Jaroslavu Rojíčkovi, Ph.D** za odborné vedení, poskytnutí cenných rad a připomínek při vypracování této bakalářské práce. Dále bych také chtěl poděkovat panu **Ing. Jakubu Legerskému** z firmy Papcel a to za ochotu a zodpovězené dotazy. A nakonec bych rád poděkoval všem z katedry Aplikované mechaniky, kteří se podíleli na této bakalářské práci i sebemenší radou nebo zodpovězeným dotazem.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	- 9 -
1. ÚVOD	- 11 -
1.1. Papír a jeho historie	- 12 -
1.2. Strojová výroba papíru.....	- 13 -
1.3. Seznámení s výrobní linkou.....	- 13 -
2. TEORIE	- 15 -
2.1. Castiglianova věta ve staticky neurčitých úlohách	- 15 -
2.2. Metoda konečných prvků.....	- 17 -
2.2.1. Úvod do MKP	- 17 -
2.2.2. Obecný postup řešení úlohy metodou MKP	- 17 -
2.2.3. Teoretický základ MKP	- 18 -
3. ROZBOR ZÁTĚŽÍ A ZATĚŽOVACÍCH STAVŮ	- 22 -
3.1. Vlastní tíha konstrukce	- 22 -
3.2. Tíha Yankee válce	- 23 -
3.3. Tíha zákrytu Yankee válce	- 23 -
3.4. Přítlak přitlačného válce	- 23 -
3.5. Zatěžovací stavy	- 23 -
4. ZJEDNODUŠENÝ ANALYTICKÝ VÝPOČET	- 24 -
4.1. Zjednodušení.....	- 24 -
4.2. Průřezové charakteristiky	- 24 -
4.3. Reakce ve vazbách.....	- 25 -
4.4. Napětí.....	- 28 -
5. VÝPOČET METODOU MKP – PATRAN	- 29 -
5.1. Tvorba geometrického modelu	- 29 -
5.2. Materiálové vlastnosti.....	- 30 -
5.3. Tvorba konečno-prvkového modelu.....	- 31 -
5.4. Aplikované okrajové podmínky.....	- 33 -
5.4.1. Vetknutí/Uložení.....	- 33 -
5.4.2. Symetrie	- 33 -
5.4.3. Zatížení LC01 – Tíha konstrukce.....	- 34 -
5.4.4. Zatížení LC02 – Tíha Yankee válce	- 34 -
5.4.5. Zatížení LC03 – Tíha zákrytu Yankee válce	- 34 -
5.4.6. Zatížení LC04 – Přitlačný válec.....	- 35 -

6. VÝPOČET METODOU MKP – ANSYS	- 36 -
6.1. Tvorba geometrického modelu	- 36 -
6.2. Tvorba konečno-prvkového modelu	- 37 -
6.3. Aplikované okrajové podmínky.....	- 38 -
7. VÝSLEDKY VÝPOČTŮ POMOCÍ METODY MKP.....	- 39 -
7.1. Celkové posunutí při kombinovaném zatížení LC01 až LC04.....	- 39 -
7.2. Redukované napětí při kombinovaném zatížení LC01 až LC04	- 40 -
7.3. Celkové posunutí při zatížení LC01	- 41 -
7.4. Redukované napětí při zatížení LC01	- 42 -
7.5. Celkové posunutí při zatížení LC02	- 43 -
7.6. Redukované napětí při zatížení LC02.....	- 44 -
7.7. Celkové posunutí při zatížení LC03	- 45 -
7.8. Redukované napětí při zatížení LC03	- 46 -
7.9. Celkové posunutí při zatížení LC04	- 47 -
7.10. Redukované napětí při zatížení LC04.....	- 48 -
8. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	- 49 -
8.1. Stanovení návrhové únosnosti	- 49 -
8.2. Vyhodnocení redukovaného napětí na jednotlivých dílech konstrukce	- 49 -
8.3. Výsledné hodnoty napětí a pevnostní podmínka	- 50 -
9. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ANALYTICKÉ METODY S MKP	- 51 -
10. ZÁVĚR.....	- 52 -
11. POUŽITÉ ZDROJE A LITERATURA	- 53 -
PŘÍLOHY.....	- 54 -

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Velká písmena latinské abecedy

<u>Značení</u>	<u>Popis veličiny</u>	<u>Jednotka</u>
$[A]$	matice obsahující hodnoty souřadnic uzlů	$[-]$
A, B, C, D	silové reakce ve vetknutí	$[N]$
A-A, B-B, C-C	označení průřezů jednotlivých nosníků	$[-]$
ČSN EN	převzatá evropská norma	$[-]$
$[E]$	matice elastických konstant	$[MPa]$
E	modul pružnosti materiálu v tahu	$[MPa]$
E_i	modul pružnosti nosníku na daném úseku	$[MPa]$
$\{F\}$	celkový vektor zobecněných uzlových sil	$[N]$
F_i	zatěžující síla, podle které derivujeme	$[N]$
F_{G-C}	tíha obou zákrytů yankee válce	$[N]$
F_{G-YC}	tíha yankee válce	$[N]$
F_P	přítlak přítlačného válce	$[N \cdot m^{-1}]$
F_{PC}	přítlačná síla vyvinutá přítlačným válcem	$[N]$
$[G]$	transformační matice	$[-]$
I_i	plošný moment setrvačnosti nosníku na daném úseku	$[mm^4]$
$I_{y_{A-A}}, I_{y_{B-B}}, I_{y_{C-C}}$	plošný moment setrvačnosti průřezu a-a, b-b a c-c	$[mm^4]$
$[K]$	globální matice tuhosti	$[N \cdot mm^{-1}]$
LC01	označení prvního zátěžného stavu	$[-]$
$[M]$	matice báзовých funkcí	$[-]$
M_i	zatěžující moment, podle kterého derivujeme	$[N \cdot m]$
M_1, M_2	momentové reakce ve vetknutí	$[N \cdot m]$
$[N]$	matice tvarových funkcí	$[-]$
$\{R\}^{(e)}$	vektor zobecněných sil v uzlech	$[N]$
R_d	návrhová únosnost	$[MPa]$
R_m	mez pevnosti materiálu	$[MPa]$
$R_{p_{0,2}}$	smluvní mez kluzu materiálu	$[MPa]$
U	celková deformační energie tělesa	$[J]$
S	plocha, na které působí síla F	$[mm^2]$

Malá písmena latinské abecedy

<u>Značení</u>	<u>Popis veličiny</u>	<u>Jednotka</u>
a_i, b_i	meze platnosti dílčích ohybových momentů	[mm]
b	šířka profilů	[mm]
c, d	délky nosníků	[mm]
g	tíhové zrychlení	[m · s ⁻²]
h_1, h_2, h_3	výšky profilů	[mm]
\boxed{i}	označení pozice/místa, kde $i = 1, 2, 3, \dots$	[–]
$[k]$	lokální matice tuhosti	[N · mm ⁻¹]
l	šířka papírového pásu / šířka yankee válce	[mm]
m_{C1}	hmotnost první poloviny zákrytu yankee válce	[kg]
m_{C2}	hmotnost druhé poloviny zákrytu yankee válce	[kg]
m_{YV}	hmotnost yankee válce	[kg]
n	celkový počet úseků na nosníku / elementů v konstrukci	[–]
$\{r\}$	vektor zobecněných uzlových posuvů	[mm]
t_1, t_2, t_3, t_4	tloušťky stěn profilů	[mm]
$\{u\}$	vektor posunutí	[mm]
$u_{\boxed{1}}$	posunutí ve směru osy x v místě $\boxed{1}$	[mm]
$v_{\boxed{1}}$	posunutí ve směru osy y v místě $\boxed{1}$	[mm]
x, y, z	označení souřadných os	[–]

Písmena řecké abecedy

<u>Značení</u>	<u>Popis veličiny</u>	<u>Jednotka</u>
$\{\alpha\}$	vektor zobecněných souřadnic	[mm]
γ_M	součinitel spolehlivosti materiálu	[–]
$\{\Delta\}$	vektor zobecněných posuvů pro všechny uzly konečno-prvkového modelu	[mm]
$[\partial]$	operátorová matice	[–]
$\{\varepsilon\}$	vektor poměrných deformací	[–]
μ	Poissonovo číslo	[–]
ρ	hustota materiálu	[kg · m ³]
$\{\sigma\}^{(e)}$	vektor obsahující složky tenzoru napětí	[MPa]
σ	napětí v tlaku	[MPa]
σ_{red}	redukované napětí	[MPa]
$\varphi_{\boxed{1}}$	natočení v místě $\boxed{1}$	[°]

1. ÚVOD

Tématem této bakalářské práce je statický výpočet nosné konstrukce nesoucí papírenský Yankee válec, jenž je částí výrobní linky. Účelem celé výrobní linky je výroba Tissues (papírové ubrousky, kapesníky, utěrky, toaletní papír).

Obsah této práce se skládá ze dvou hlavních úseků a to teoretického a praktického, jenž jsou následně členěny na další podkapitoly. Teoretická část je věnována problematice Castiglianovy věty použité při řešení analytické metody a následně je nastíněna metoda konečných prvků. Praktická část se zabývá vlastním výpočtem konstrukce a to dvěma způsoby. V prvním se podíváme na zjednodušený analytický výpočet konstrukce. V následující části bude již výpočet řešen pomocí metody konečných prvků. Na závěr dojde k vyhodnocení a porovnání výsledků obou metod.

Cílem této práce je zjistit, jestli zadaná nosná konstrukce vydrží zatížení vznikající od prvků umístěných na konstrukci a následně zda vyhoví normě ČSN EN 1993 zabývající se navrhováním ocelových konstrukcí pozemních a inženýrských staveb.

Pro sepsání úvodní části této práce byly použity tyto prameny uvedené v použité literatuře [4], [7], [8] a [9].



Obrázek 1 – Již smontovaná nosná konstrukce s Yankee válcem a zákryty (řešená nosná konstrukce se nachází ve zvýrazněné části) [9]

1.1. Papír a jeho historie

V dnešní době je papír jedním z nejpoužívanějších materiálů. Můžeme se s ním setkat téměř kdekoli – ve škole, v kanceláři, v obchodech a mnoha dalších místech. K jeho vzniku přispěla lidská touha zaznamenávat vědomosti a poznatky, které provází lidstvo od nepaměti. Nejstaršími doloženými záznamy jsou nástěnné malby z doby kamenné. Pro záznam prvního klínového písma se již používaly hliněné tabulky a desky. Desky se staly běžným prostředkem pro uchování písma. Řekové a Římané si oblíbili desky z kamene, později z kovu a nakonec ze dřeva s povrchem pokrytým voskem. Všechny tyto varianty měly ovšem nevýhodu a to z hlediska váhy při manipulaci a obtížnosti záznamu do materiálu samotného – vytesávání a vyrývání.

Nejnámějším předchůdcem papíru je papyrus pocházející z Egypta. Jednalo se o stvolý rostliny šáchoru, které se pokládaly v první vrstvě vedle sebe, a poté se následující vrstva pokládala napříč. Vznikl tak základ, který byl následně slepen a vyhlazen. Pro svou skladnost, kvalitu a lehkost začal postupně vytlačovat používané desky. Dalším prostředkem pro záznam se stal pergamen, což byla jemně vydělaná zvířecí kůže. Výroba pergamenu byla náročná a zdoluhavá, ovšem jeho trvanlivost byla výrazně vyšší, a proto se nejčastěji používal pro uchování důležitých dokumentů, kde byla požadována dlouhá trvanlivost.

Všechny již dříve uvedené materiály byly překonány papírem, jehož původ sahá do Číny. V podobě, jak ho známe dnes, se začal vyrábět kolem roku 105 z hedvábí. Po jeho objevu se postupně začal šířit do světa. Nejprve se o tomto objevu dozvěděli v 7. století v Japonsku, poté se papír šíří v 8. století do Arabských zemí, odkud se dostal papír až k nám do Evropy. První evropské papíry se vyráběly z lněných a bavlněných hadrů. Z důvodu narůstající poptávky po papíru a následném nedostatku hadrů se začaly hledat nové materiály pro výrobu. Koncem 18. století se výroba papíru zaměřila na výrobu s využitím dřeva. Zprvu byly používány jemné piliny, až později se uchytila dřevná buničina (celulóza), která se nakonec ukázala jako nejvhodnější. Dnes je celulóza výchozím materiálem téměř pro všechny běžné papírenské výrobky.

1.2. Strojová výroba papíru

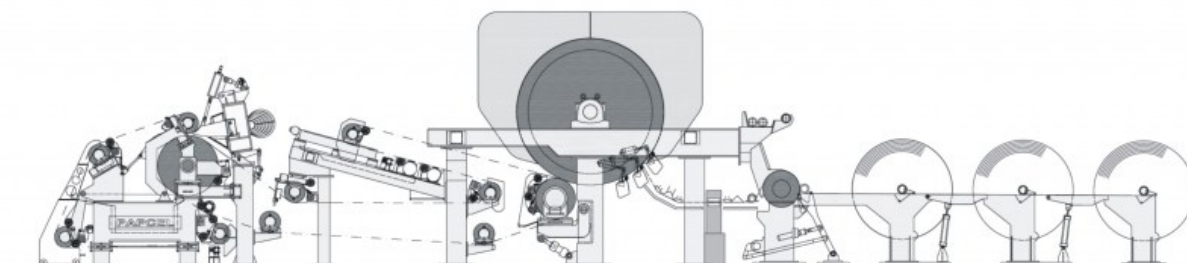
Zprvu byla běžná ruční výroba papíru, ovšem po vynálezu knihtisku vzrostla spotřeba papíru a navíc se objevily nároky na jeho stejnoměrnost. Ruční výroba pro svou nízkou produkci a nestejnoměrnost přestala být vhodná a začalo se od ní upouštět. Postupně se pro jednotlivé fáze výroby začaly hojně využívat stroje. Výroba se dá rozdělit do několika procesů:

- **Výroba vláknoviny/buničiny** ze vstupní suroviny
- **Příprava vláknoviny** mechanicky a chemicky podle typu papíru a potřebných požadovaných vlastností
- **Papírenský stroj** – vláknovina vstupuje do procesu, prochází přes mokrou část do lisovací části, odkud pokračuje do sušící části, na jejímž konci se nachází navíječka papíru
- **Koncové zpracování** – řezání získané role papíru na archy, v případě Tissues vícevrstvé převíjení rolí, atd.

1.3. Seznámení s výrobní linkou

Jak již bylo zmíněno v úvodu, výrobní linka související s nosnou konstrukcí slouží k výrobě Tissues. Standartní řešení tohoto stroje firmy Papcel se skládá z těchto částí:

- **Nátok**
- **Sítová část** s Crescent formerem
- **Lisová část**: samostatný sací lis nebo sací lis + slepě vrtaný lis, případně Shoe press
- **Yankee sušící válec**: Ø 3,6 - 5,5 m (litina nebo ocel) s vysoce účinnými zákryty
- **Kalandr** s říditelným průhybem
- Plně automatický **navíječ** a poté dvou až čtyřvrstvá **spojovací převíječka** a nakonec **Balička**



Obrázek 2 – Výrobní linka na Tissues papír [8]

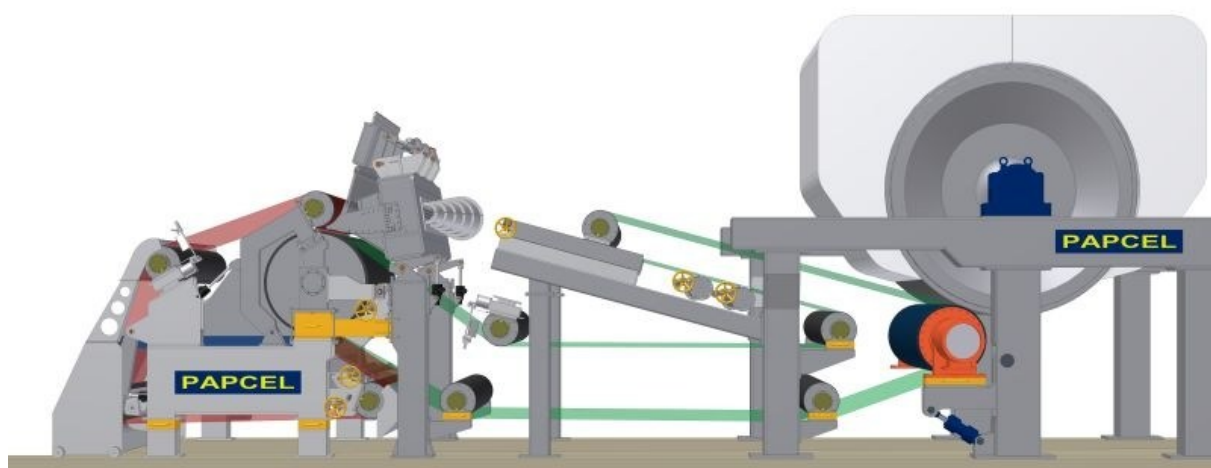
Proces výroby začíná nátokem vstupní suroviny mezi síto a plstěnc (na obrázku č. 3 zelené a červené plátno), mezi které je následně sevřena. Působením hydraulického tlaku vyvolaného tahem síta na formovací válec dojde k jejímučástečnému odvodnění.

Dále surovina putuje na plstěnci do lisovací části, která zajišťuje vstupní sušinu na Yankee válec přibližně od 37 do 42%. To záleží na provedení. Nejjednodušším provedením je pouze jeden sací lisovací válec, dále zde může být dvojitý přítlačný lis a posledním nejmodernějším řešením je shoe press, kdy se jedná o botkový válec zajišťující optimální řízení měkkosti a suchosti.

Po průchodu lisem se dostává papír do sušící části, jenž je tvořena Yankee válcem a jeho zákrytem. Válec i zákryty jsou vyhřívány buď parou nebo plynem, kdy teplota vzduchu při vyhřívání parou dosahuje cca 130°C a v případě plynu až 550°C. V sušící části je důležitým parametrem samotné rozdělení výkonu sušení mezi válec a zákryt, kdy se tento poměr pohybuje v rozmezí od 40/60 až 60/40. Pokud je docíleno vyššího sušení pomocí zákrytu, dochází při výrobě k dosažení lepší měkkosti papíru ovšem na úkor nákladnosti, a naopak při nižší měkkosti dochází k poklesu nákladů na sušení.

Na konci linky se nachází již navíječ pro vyrobený papír a zásobník až na tři navinuté role. Poslední dojezdové místo je rovněž místem, kde dojde ke zvážení hotové role papíru, než je převezena dále.

Pro další zpracování výrobku je role převezena na převíječku, kde dojde k vytvoření vícevrtvého papíru, jenž je následně nařezán na požadovaný rozměr, čímž výrobní proces končí.



Obrázek 3 – Detailnější pohled na výrobní linku Tissue papíru [7]

2. TEORIE

Úkolem této kapitoly bude nastínit teoretické postupy, které byly následně použity při samotném řešení. Castiglianova věta byla použita při řešení staticky neurčité úlohy zjednodušeného analytického výpočtu. Následně byla provedena analýza celé nezjednodušené konstrukce pomocí metody konečných prvků.

2.1. Castiglianova věta ve staticky neurčitých úlohách

Pro sepsání této podkapitoly byly využity skripta Pružnosti a Pevnosti [10]. Jedná se o stručný úvod do problematiky, podrobné odvození Castiglianovy věty pak můžeme najít v těchto skriptech na str. 87, odvození vztahů pro aplikaci na nosníky pak nalezneme na str. 157.

Jestliže se těleso nachází ve statické rovnováze (počet vazbových a zatěžujících účinků je roven počtu stupňů volnosti soustavy), stačí nám pro zjištění reakcí úlohy sestavit 3 rovnice rovnováhy.

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \\ \sum M &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.1.1)$$

Avšak jestliže je těleso staticky neurčité (počet vazbových a zatěžujících účinků je menší, než počet stupňů volnosti soustavy), je třeba formulovat deformační podmínky, aby bylo možné určit všechny reakce.

- Pro jedenkrát staticky neurčitou úlohu je nutno definovat jednu deformační podmínku, která nám definuje stav ve zvoleném místě, o kterém něco víme (např. místo zavazbení),
- pro dvakrát staticky neurčitou definovat dvě deformační podmínky, atd...

Nejčastěji používané deformační podmínky jsou tyto:

- Pro vetknutí – nulové natočení a průhyb ($\varphi = 0$ a $w = 0$)
- Pro kloubovou pevnou a posuvnou vazbu – nulový průhyb ($w = 0$)

Pro výpočty s průhybem a natočením využijeme Castiglianovu větu vycházející z deformační energie. Jestliže celkovou deformační energii tělesa U vyjádřenou v závislosti na vnějším zatížení parciálně zderivujeme podle libovolné působící vnější síly F_i , získáme hodnotu průhybu v místě i , tedy místě působíště síly F_i . Matematicky lze tuto definici zapsat jako:

$$w_i = \frac{\delta U}{\delta F_i} \quad (2.1.2)$$

Obdobně lze vyjádřit úhel natočení. Jestliže celkovou deformační energii tělesa U vyjádřenou v závislosti na vnějším zatížení parciálně zderivujeme podle libovolného momentu M_i , získáme hodnotu úhlu natočení v místě i , tedy v místě působení momentu M_i . Matematicky lze opět tuto definici zapsat jako:

$$\varphi_i = \frac{\delta U}{\delta M_i} \quad (2.1.3)$$

Použití Castiglianovy věty ve staticky neurčité úloze spočívá v tom, že namísto vyjádření průhybu nebo natočení, jenž jsou známy z deformačních podmínek, vyjádříme neznámé reakce. Musíme si však dát pozor při vyjadřování momentových rovnic jednotlivých úseků $M_i(x)$, aby zde byly obsaženy reakce, podle kterých budeme následně při výpočtu derivovat.

Pro výpočet průhybu nosníku, jenž byl rozdělen na více úseků, použijte vztah:

$$w = \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i \cdot I_i} \cdot \int_{a_i}^{b_i} M_i(x) \cdot \frac{\delta M_i(x_i)}{\delta F} \cdot dx_i, \quad (2.1.4)$$

v případě výpočtu úhlu natočení vztah:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i \cdot I_i} \cdot \int_{a_i}^{b_i} M_i(x) \cdot \frac{\delta M_i(x_i)}{\delta M} \cdot dx_i \quad (2.1.5)$$

kde n je počet dílčích úseků

E_i je modul pružnosti v tahu na daném úseku,

I_i je plošný moment setrvačnosti nosníku na daném úseku

a_i, b_i jsou meze platnosti jednotlivých ohybových momentů daných úseků

$M_i(x)$ jsou dílčí momenty jednotlivých úseků.

2.2. Metoda konečných prvků

Předlohou pro odvození rovnic byly publikace uvedené v použité literatuře [5], [6] a [11].

2.2.1. Úvod do MKP

Metoda konečných prvků (zkráceně MKP) je obecná numerická metoda, kterou můžeme využít při řešení celé řady úloh – vznikla při analýze napjatosti konstrukcí a následně se rychle rozšířila a získala uplatnění v mnoha dalších oblastech – vedení tepla, proudění tekutin, analýza elektromagnetických polí, atd. Atraktivita MKP spočívá v její poměrně velké univerzálnosti a schopnosti popsat i velice rozsáhlé a složité úlohy.

Z inženýrského hlediska lze MKP chápat jako rozložení spojitého tělesa na konečný počet menších částí tzv. elementů neboli konečných prvků, jejichž analýza chování je v porovnání s celým tělesem poměrně jednoduchá. Po rozložení tělesa je nutné formulovat podmínky zajišťující interakci těchto prvků mezi sebou, aby tvořili souvislý celek, tedy aby splnily podmínku rovnováhy a kompatibility konstrukce. Z těchto podmínek se posléze vypočítají podle metody neznámé deformační nebo silové faktory a to nejdříve na hranicích prvků a následně i uvnitř.

Díky univerzálnímu obecnému postupu při analýze elementu, je metoda MKP dobře algoritmizovatelná. Využití počítačů v kombinaci s MKP nám umožňuje zanalyzovat a otestovat výrobek, jehož prototyp ještě není fyzicky vyroben. Díky tomu můžeme odhalit kritická místa v návrhu a zjednat případné nápravy. Počítačové ověření vlastností a přípustného zatížení nevyrobeného výrobku je při vývoji mnohem levnější než opakovaná výroba prototypu a jeho následné testování a úpravy.

2.2.2. Obecný postup řešení úlohy metodou MKP

Postup při řešení úlohy metodou konečných prvků se dá shrnout do tří hlavních fází:

1) Diskretizace úlohy – rozdělení kontinua na prvky

- Velikou roli zde hraje zkušenost, intuice a cit výpočtáře
- Existuje velké množství konečných prvků, jenž lze rozdělit z různých hledisek, nejčastěji používané jsou:
 - 1D – prutové, nosníkové
 - 2D – trojúhelníkový nebo obdélníkový prvek
 - 3D – jehlanový nebo šesti-stěnový prvek

2) Stanovení poddajnosti (respektive tuhosti prvků) – analýza prvku

- Na základě svých geometrických a fyzikálních vlastností odolávají prvky deformaci, tuto míru vzdoru nám vyjadřují matice tuhosti (popřípadě poddajnosti), znalost těchto matic je podstata MKP analýzy

3) Analýza konstrukce

- Nejprve sestavíme globální matici tuhosti, kterou následně použijeme v základní rovnici MKP, což je vlastně soustava rovnic. Aby základní rovnice MKP mohla být řešena, je třeba aplikovat okrajové podmínky (posuvy, natočení, silové účinky, atd.). Nakonec je třeba vybrat metodu, jež bude použita pro řešení získané soustavy rovnic (např. Gaussova eliminační, iterační, atd.).

2.2.3. Teoretický základ MKP

Odvození základní rovnice MKP vychází z principu minima potenciální energie systému. Potenciální energii systému můžeme vyjádřit jako součet deformační energie napjatosti a práce vnějších sil. Minimum této energie pak získáme z první derivace potenciální energie, která je rovna nule. Získáme tak základní rovnici MKP, která má pro statickou úlohu v maticovém zápisu tvar (podrobné odvození pak můžeme najít v této publikaci [11]):

$$[K] \cdot \{\Delta\} = \{F\} \quad (2.2.1)$$

kde $[K]$ je globální matice tuhosti úlohy,
 $\{\Delta\}$ je vektor zobecněných posuvů pro všechny uzly konečno-prvkového modelu,
 $\{F\}$ je celkový vektor zobecněných uzlových sil.

Pro každý prvek úlohy je potřeba najít tyto vztahy:

$$\{u\} = [N] \cdot \{r\} \quad (2.2.2)$$

$$\{\epsilon\} = [G] \cdot \{r\} \quad (2.2.3)$$

kde $[N], [G]$ jsou zatím nám neznámé transformační matice,
 $\{u\}$ jsou posuvy v libovolném místě elementu,
 $\{r\}$ jsou posuvy v uzlech,
 $\{\epsilon\}$ je přetvoření.

Jelikož ovšem neznáme chování elementu uvnitř (funkce posunutí), funkce posunutí aproximujeme pomocí polynomů. Důvodem volby polynomů jsou snadné matematické operace s těmito polynomy a dále se dá snadno změnit stupeň polynomu, potřebný k dosažení žádané přesnosti náhrady.

Úplný polynom n -tého stupně pro vyjádření posuvu jako funkce jedné proměnné v případě jednorozměrné úlohy je:

$$u_x(x) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot x^2 + \dots + \alpha_m \cdot x^n \quad (2.2.4)$$

Tato rovnice vyjadřuje posuv jako funkci souřadnice x a dá se zapsat maticově ve tvaru:

$$\{u\} = [M] \cdot \{\alpha\} = [1, x, x^2, \dots, x^n] \cdot \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m\}^T, \quad (2.2.5)$$

kde $[M]$ je matice báзовých funkcí (matice členů polynomu),
 $\{\alpha\}$ je vektor obsahující neznámé koeficienty (tzv. zobecněné souřadnice)

Stejným způsobem se dá postupovat v případě vícerozměrných úloh, kdy přibudou další polynomy pro směr y a z . Dále v matici $[M]$ dojde k navýšení řádků a vektor $\{\alpha\}$ bude rozšířen o nové zobecněné souřadnice.

Pro jednoznačné určení zobecněných souřadnic $\{\alpha\}$ musí platit, aby počet zobecněných souřadnic byl roven počtu zobecněných posuvů na prvku, tedy aby se rovnal počtu stupňů volnosti prvku.

Rovnice (2.2.5) musí platit i pro zobecněné posuvy v uzlech. Po dosazení souřadnic jednotlivých uzlů do rovnice (2.2.5) je možno vyjádřit vektor zobecněných posuvů jako:

$$\{r\}_{(m,1)} = [A]_{(m,m)} \cdot \{\alpha\}_{(m,1)}, \quad (2.2.6)$$

kde $[A]$ je matice obsahující hodnoty souřadnic uzlů prvků,
 m je počet zobecněných posuvů, tedy počet stupňů volnosti.

Vyjádřením $\{\alpha\}$ z rovnice (2.2.6) dostaneme:

$$\{\alpha\} = [A]^{-1} \cdot \{r\}. \quad (2.2.7)$$

Následným dosazením zpět do rovnice (2.2.5) získáme vztah mezi posunem kontinua na základě zobecněných posuvů v uzlech prvku:

$$\{\mathbf{u}\} = [\mathbf{M}] \cdot [\mathbf{A}]^{-1} \cdot \{\mathbf{r}\} = [\mathbf{N}] \cdot \{\mathbf{r}\}, \quad (2.2.8)$$

kde $[\mathbf{N}]$ je matice tvarových funkcí:

$$[\mathbf{N}] = [\mathbf{M}] \cdot [\mathbf{A}]^{-1}. \quad (2.2.9)$$

Použijeme Cauchyho geometricko-deformační rovnice, abychom vyjádřili vektor poměrných deformací $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$. Pro případ prostorové úlohy bude rovnice vypadat následovně:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}^T \cdot \{\mathbf{u}\} = [\boldsymbol{\partial}]^T \cdot \{\mathbf{u}\}, \quad (2.2.10)$$

kde $[\boldsymbol{\partial}]$ je operátorová matice.

Po dosazení rovnice (2.2.8) za $\{\mathbf{u}\}$ z rovnice (2.2.10) dostaneme vztah pro přetvoření elementu v následujícím tvaru:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [\boldsymbol{\partial}]^T \cdot [\mathbf{N}] \cdot \{\mathbf{r}\} = [\mathbf{G}] \cdot \{\mathbf{r}\}, \quad (2.2.11)$$

kde $[\mathbf{G}]$ je transformační matice:

$$[\mathbf{G}] = [\boldsymbol{\partial}]^T \cdot [\mathbf{N}]. \quad (2.2.12)$$

Pro získání vztahu pro lokální matici tuhosti použijeme vztah celkové deformační energie jednoho elementu, který upravíme dosazením Hookova zákona:

$$U^{(e)} = \frac{1}{2} \iiint_{V^{(e)}} \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^{(e)T} \cdot \{\boldsymbol{\sigma}\}^{(e)} \cdot dV = \frac{1}{2} \iiint_{V^{(e)}} \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^{(e)T} \cdot [\mathbf{E}] \cdot \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^{(e)} \cdot dV \quad (2.2.13)$$

kde $[\mathbf{E}]$ je matice elastických konstant,
 $\{\boldsymbol{\sigma}\}^{(e)}$ je vektor obsahující složky tenzoru napětí.

Následným dosazením vztahu (2.2.11) získáme rovnici:

$$U^{(e)} = \frac{1}{2} \iiint_{V^{(e)}} \{\mathbf{r}\}^{(e)T} \cdot [\mathbf{G}]^T \cdot [\mathbf{E}] \cdot [\mathbf{G}] \cdot \{\mathbf{r}\}^{(e)} \cdot dV \quad (2.2.14)$$

Úpravou tohoto vztahu získáme:

$$\begin{aligned} U^{(e)} &= \frac{1}{2} \cdot \{\mathbf{r}\}^{(e)T} \cdot \left(\iiint_{V^{(e)}} [\mathbf{G}]^T \cdot [\mathbf{E}] \cdot [\mathbf{G}] \cdot dV \right) \cdot \{\mathbf{r}\}^{(e)} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \{\mathbf{r}\}^{(e)T} \cdot [\mathbf{k}]^{(e)} \cdot \{\mathbf{r}\}^{(e)} \end{aligned} \quad (2.2.15)$$

kde $[\mathbf{k}]^{(e)}$ je lokální matice tuhosti prvku

$$[\mathbf{k}]^{(e)} = \iiint_{V^{(e)}} [\mathbf{G}]^T \cdot [\mathbf{E}] \cdot [\mathbf{G}] \cdot dV \quad (2.2.16)$$

Pokud je úloha tvořena více elementy, získáme globální matici tuhosti součtem přes všechny prvky. V následujícím vztahu je symbolicky naznačena sumace jednotlivých lokálních matic tuhostí, jejímž výsledkem je globální matice tuhosti analyzované úlohy:

$$[\mathbf{K}] = \sum_e^n [\mathbf{k}]^{(e)} \quad (2.2.17)$$

Aby dříve uvedený vztah měl smysl, je nutné jednotlivé lokální matice tuhosti umístit na příslušná místa v globální matici tuhosti např. za pomoci lokalizační tabulky.

Stejným postupem, tedy součtem, získáme celkový vektor zobecněných uzlových sil:

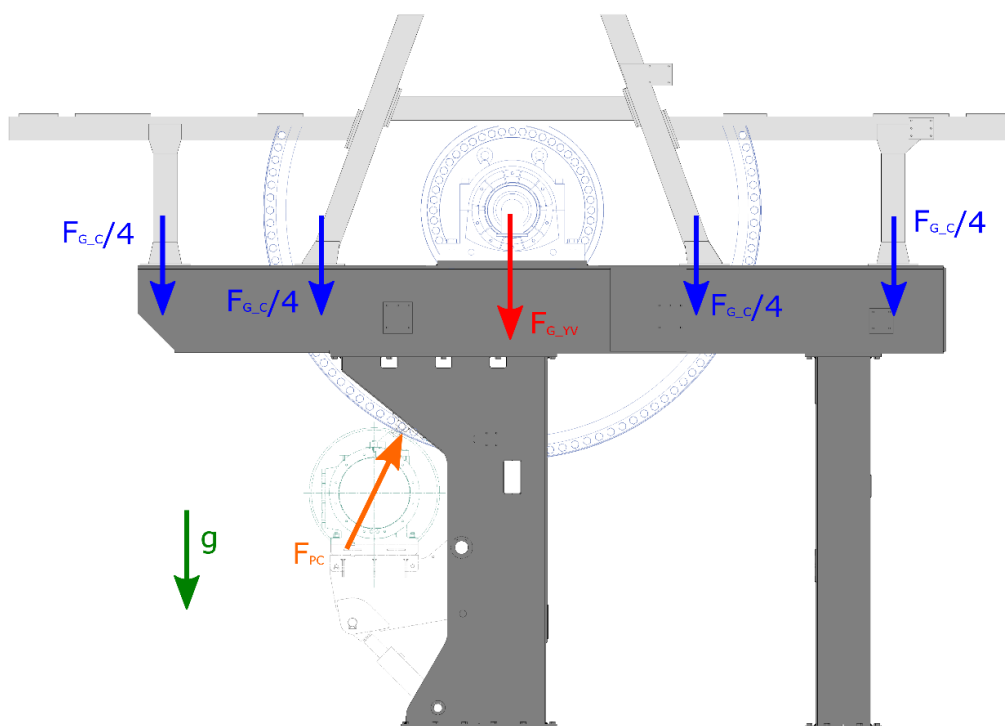
$$\{\mathbf{F}\} = \sum_e^n \{\mathbf{R}\}^{(e)} \quad (2.2.18)$$

kde $\{\mathbf{R}\}^{(e)}$ je vektor zobecněných sil v uzlech.

Dosazením rovnic (2.2.17) a (2.2.18) do základní rovnice MKP (2.2.1) získáme soustavu rovnic. Ta může být řešena až po aplikaci okrajových podmínek. K řešení získané soustavy rovnic se pak používají různé metody (Gaussova eliminační metoda, frontální metoda a různé iterační metody jako například Jacobiova nebo Gauss-Seidelova). Výsledkem jsou pak hodnoty sil a posunutí, které lze následně ještě přepočíst na napětí.

3. ROZBOR ZÁTĚŽÍ A ZATĚŽOVACÍCH STAVŮ

Úloha je po dohodě s firmou Papcel, která je zadavatelem a jenž dodala veškerou potřebnou výkresovou dokumentaci, řešena jako statická pevnostní analýza nosné konstrukce (tmavě šedou barvou znázorněná část na obrázku 4). Na konstrukci působí několik hlavních zátěží – zemská gravitace, dále tíha Yankee válce a jeho zákrytu a nakonec přítlačný válec. Další zatížení způsobené drobnými komponenty (motor, vedení hydraulického potrubí, atd.), jenž jsou zavěšeny na nosné konstrukci, byly po domluvě vzhledem k malé váze oproti ostatním zátěžím zanedbány a nejsou ve výpočtech zahrnuty.



Obrázek 4 – Zátěže konstrukce

3.1. Vlastní tíha konstrukce

Vlastní tíha konstrukce je dána zemskou gravitací, která je definována tíhovým zrychlením, a měrnou hmotností materiálu tvořící konstrukci, což je ocel.

Pro výpočty byla použita hustota oceli $\rho = 7\,900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ tvořící konstrukci. Tíhové zrychlení uvažujeme $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, což je hodnota platná pro naši zeměpisnou šířku a nadmořskou výšku. Pro jiné zeměpisné šířky se hodnota zrychlení mění minimálně. Rovněž s nadmořskou výškou dochází k minimální změně, kdy s rostoucí vzdáleností od Země klesá hodnota zrychlení přibližně o $3 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ na jeden metr. K výraznější změně proto dojde až ve výšce stovek kilometrů, a jelikož zařízení bude provozováno na zemském povrchu, tato situace nemůže nastat.

3.2. Tíha Yankee válce

Svojí vahou tvoří Yankee válec hlavní zátěž nosné konstrukce. Na konstrukci je umístěn ve dvojici ložiskových domů nacházejících se nad hlavními vertikálními nosníky. Z dodané dokumentace bylo možné vyčíst váhu válce a to $m_{YV} = 57\,000\text{ kg}$. Tato váha odpovídá hmotnosti plně vybaveného válce. Působící síla má poté velikost:

$$F_{GYC} = m_{YV} \cdot g = 57\,000 \cdot 9,81 = 559\,170\text{ N} \quad (3.2.1)$$

3.3. Tíha zákrytu Yankee válce

Zákryt válce je tvořen dvěma polovinami. Zákryty jsou namontovány na pomocné nosné konstrukci (světle šedou barvou znázorněná část na obrázku 4) a ta je poté připevněna na hlavní nosnou konstrukci, která nás zajímá. Obě poloviny zákrytu neváží stejně a jedna je těžší, ovšem při výpočtu bude uvažováno o součtu těchto hmotností a rovnoměrném rozdělení zátěže na hlavní nosnou konstrukci. Z dodaných výkresů byly zjištěny jejich hmotnosti $m_{C1} = 9230\text{ kg}$ a $m_{C2} = 8670\text{ kg}$. Velikost působící síly je:

$$F_{Gc} = (m_{C1} + m_{C2}) \cdot g = (9230 + 8670) \cdot 9,81 = 175\,559\text{ N} \quad (3.3.1)$$

3.4. Přítlak přítlačného válce

Mechanické snížení vlhkosti papíru při vstupu na sušící válec je realizováno pomocí přítlačného válce. Ten je na nosné konstrukci umístěn pomocí mechanismu, který umožňuje natočení a přítlak je regulován pomocí dvou hydraulických válců. Velikost maximálního přítlaku je rovna $F_p = 120\text{ kN/m}$. Šířka papíru / válce je $l = 2885\text{ mm}$. Působící síla je tedy rovna:

$$F_{PC} = F_p \cdot l = 120\,000 \cdot 2885 \cdot 10^{-3} = 346\,200\text{ N} \quad (3.4.1)$$

3.5. Zatěžovací stavy

Nosná konstrukce je zatížena účinky, které jsou popsány výše. Pro analýzu MKP, která bude řešena v 5. a 6. kapitole této práce, budou uvažovány tyto zatěžovací stavy:

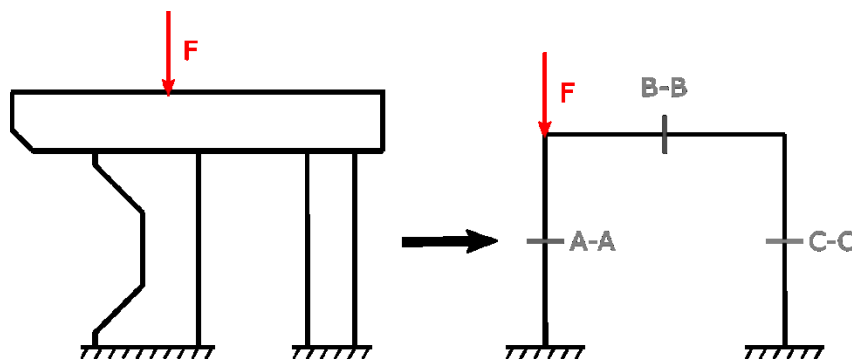
- LC01 ... Vlastní tíha konstrukce
- LC02 ... Tíha Yankee válce
- LC03 ... Tíha zákrytu válce
- LC04 ... Přítlak přítlačného válce

4. ZJEDNODUŠENÝ ANALYTICKÝ VÝPOČET

Pro analytický výpočet byl jako zatěžující účinek vybrán zatěžující stav LC02. Stav LC02 byl zvolen, jelikož svojí velikostí tvoří hlavní zatížení konstrukce, a i přes zjednodušení byla snaha vystihnout podstatu úlohy. Úloha je staticky neurčitá a pro řešení byl použit postup, který byl nastíněn v teoretické části této bakalářské práce

4.1. Zjednodušení

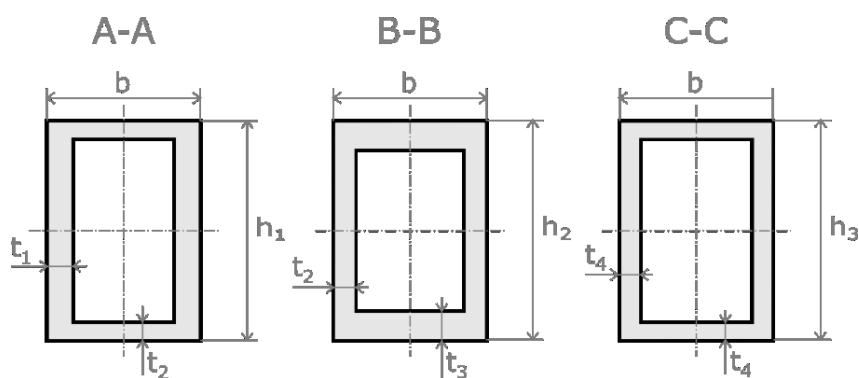
Před zahájením samotného analytického výpočtu bylo provedeno zjednodušení konstrukce. Bylo využito symetrie konstrukce, proto mohla být řešena pouze jedna polovina. Poté byly zjednodušeny jednotlivé průřezy nosníků, kdy byly vybrány 3 průřezy, které jsou následně ve výpočtech po celé délce jednotlivých nosníku neměnné.



Obrázek 5 – Zjednodušení konstrukce

4.2. Průřezové charakteristiky

Aby bylo možné v následujících výpočtech zohlednit průřezy nosníků, bylo nutné stanovit jejich plošné momenty setrvačnosti.



Obrázek 6 – Průřezy nosníků po zjednodušení konstrukce

Znamé veličiny							
[mm]							
b	h_1	h_2	h_3	t_1	t_2	t_3	t_4
400	620	805	500	25	20	30	15

Tabulka 4.1 – Rozměry průřezů nosníků

Průřez A-A

$$I_{y_{A-A}} = \frac{b \cdot h_1^3 - (b - 2t_1) \cdot (h - 2t_2)^3}{12} = \frac{400 \cdot 620^3 - (400 - 2 \cdot 25) \cdot (620 - 2 \cdot 20)^3}{12} =$$

$$I_{y_{A-A}} = 2,2535 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 \quad (4.2.1)$$

Průřez B-B

$$I_{y_{B-B}} = \frac{b \cdot h_2^3 - (b - 2t_2) \cdot (h - 2t_3)^3}{12} = \frac{400 \cdot 805^3 - (400 - 2 \cdot 20) \cdot (805 - 2 \cdot 30)^3}{12} =$$

$$I_{y_{B-B}} = 4,9839 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 \quad (4.2.2)$$

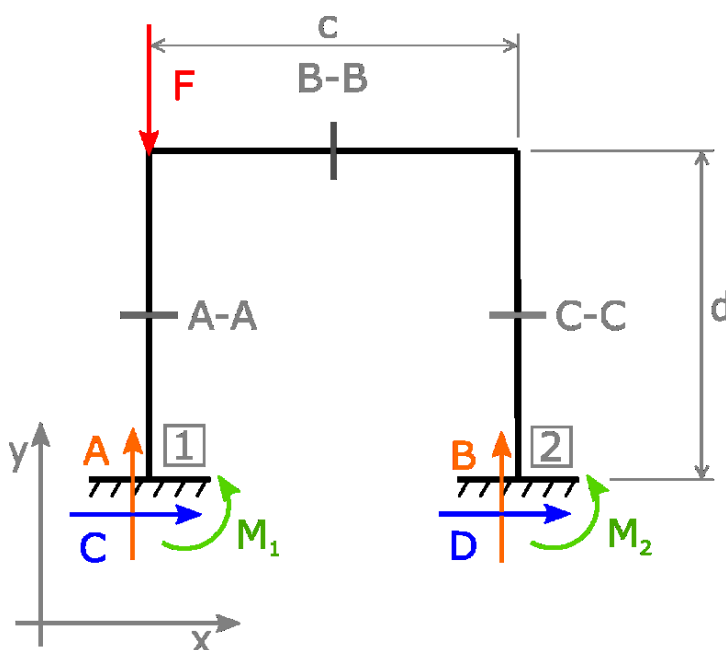
Průřez C-C

$$I_{y_{B-B}} = \frac{b \cdot h_3^3 - (b - 2t_4) \cdot (h - 2t_4)^3}{12} = \frac{400 \cdot 500^3 - (400 - 2 \cdot 15) \cdot (620 - 2 \cdot 15)^3}{12} =$$

$$I_{y_{C-C}} = 9,6846 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 \quad (4.2.3)$$

4.3. Reakce ve vazbách

Jelikož je úloha řešená jako symetrická, je působící tíhová síla od Yankee válce poloviční. Konce vertikálních nosníků jsou na spodních koncích vetknuty, proto zde vznikají 3 reakce pro každý nosník.



Obrázek 7 – Rozbor úlohy

Znamé veličiny					
[mm]		[N]	[mm ⁴]		
c	d	$F = \frac{1}{2} F_{G_{YC}} [N]$	$I_{y_{A-A}}$	$I_{y_{B-B}}$	$I_{y_{C-C}}$
3040	3800	279 585 N	$2,2535 \cdot 10^9$	$4,9839 \cdot 10^9$	$9,6846 \cdot 10^8$

Tabulka 4.2 – Znamé hodnoty

Nyní po rozboru úlohy můžeme sestavit rovnice rovnováhy:

- Osa x: $\sum F_{ix} = 0 = C + D$ (4.3.1)

- Osa y: $\sum F_{iy} = 0 = A + B - F = 0$ (4.3.2)

- Moment k místu: $\boxed{1}$: $\sum M_{\boxed{1}} = M_1 + M_2 + B \cdot c = 0$ (4.3.3)

Získali jsme tři rovnice celkem o šesti neznámých, což znamená, že úloha je třikrát staticky neurčitá. Pro vyřešení soustavy konstrukci částečně uvolníme. Do uvolnění je nutné zavést tři deformační podmínky.

Zvolené deformační podmínky:

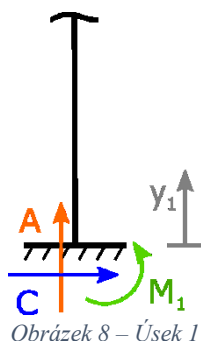
- Posuv ve směru osy x je místě vetknutí $\boxed{1}$ nulový $u_{\boxed{1}} = 0$ (4.3.4)

- Posuv ve směru osy y je místě vetknutí $\boxed{1}$ nulový $v_{\boxed{1}} = 0$ (4.3.5)

- Natočení je místě vetknutí $\boxed{1}$ nulové $\varphi_{\boxed{1}} = 0$ (4.3.6)

Po zvolení deformačních podmínek bylo možné sestavit 3 další rovnice pomocí Castiglianovy věty. Ovšem před jejich sestavením bylo potřeba sestavit rovnice průběhů ohybových momentů pro jednotlivé úseky konstrukce a poté jejich parciální derivace podle síly nebo momentu působících v místě posunutí nebo natočení.

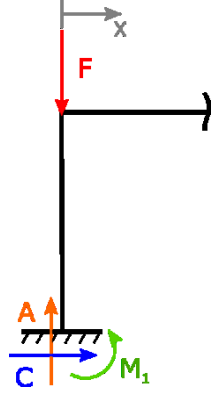
Pro $y_1 \in \langle 0; d \rangle$



$$M(y_1) = C \cdot y_1 + M_1 \quad (4.3.7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta M(y_1)}{\delta C} &= y_1 \\ \frac{\delta M(y_1)}{\delta A} &= 0 \\ \frac{\delta M(y_1)}{\delta M_1} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.3.8)$$

Pro $x \in \langle 0; c \rangle$

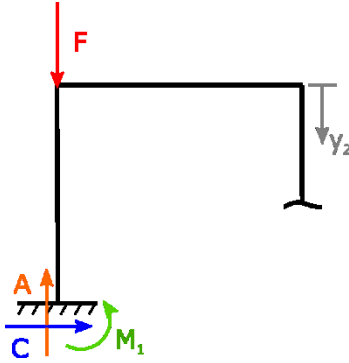


Obrázek 9 – Úsek 2

$$M(x) = d \cdot C + F \cdot x + M_1 - A \cdot x \quad (4.3.9)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta M(x)}{\delta C} &= d = 3800 \\ \frac{\delta M(x)}{\delta A} &= -x \\ \frac{\delta M(x)}{\delta M_1} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.3.10)$$

Pro $y_2 \in \langle 0; d \rangle$



Obrázek 10 – Úsek 3

$$M(y_2) = c \cdot F - c \cdot A + M_1 + C \cdot (d - y_2) \quad (4.3.11)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta M(y_2)}{\delta C} &= d - y_2 = 3800 - y_2 \\ \frac{\delta M(y_2)}{\delta A} &= -c = -3040 \\ \frac{\delta M(y_2)}{\delta M_1} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.3.12)$$

Rovnice natočení a posunutí mají po sestavení následující tvar:

$$\begin{aligned} u_{\square} &= \frac{1}{E \cdot I_{y_{A-A}}} \cdot \int_0^b M(y_1) \cdot \frac{\delta M(y_1)}{\delta C} \cdot dy_1 + \frac{1}{E \cdot I_{y_{B-B}}} \cdot \int_0^a M(x) \cdot \frac{\delta M(x)}{\delta C} \cdot dx + \\ &+ \frac{1}{E \cdot I_{y_{C-C}}} \cdot \int_0^b M(y_2) \cdot \frac{\delta M(y_2)}{\delta C} \cdot dy_2 = 0 \end{aligned} \quad (4.3.13)$$

$$\begin{aligned} v_{\square} &= \frac{1}{E \cdot I_{y_{A-A}}} \cdot \int_0^b M(y_1) \cdot \frac{\delta M(y_1)}{\delta A} \cdot dy_1 + \frac{1}{E \cdot I_{y_{B-B}}} \cdot \int_0^a M(x) \cdot \frac{\delta M(x)}{\delta A} \cdot dx + \\ &+ \frac{1}{E \cdot I_{y_{C-C}}} \cdot \int_0^b M(y_2) \cdot \frac{\delta M(y_2)}{\delta A} \cdot dy_2 = 0 \end{aligned} \quad (4.3.14)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\square} &= \frac{1}{E \cdot I_{y_{A-A}}} \cdot \int_0^b M(y_1) \cdot \frac{\delta M(y_1)}{\delta M_1} \cdot dy_1 + \frac{1}{E \cdot I_{y_{B-B}}} \cdot \int_0^a M(x) \cdot \frac{\delta M(x)}{\delta M_1} \cdot dx + \\ &+ \frac{1}{E \cdot I_{y_{C-C}}} \cdot \int_0^b M(y_2) \cdot \frac{\delta M(y_2)}{\delta M_1} \cdot dy_2 = 0 \end{aligned} \quad (4.3.15)$$

Soustava těchto 6 rovnic (rovnice (4.3.1), (4.3.2), (4.3.3), (4.3.13), (4.3.14) a (4.3.15)) byla vyřešena pomocí matematického software s názvem MathCad. Získali jsme tak hodnoty reakcí v místech vetknutí konstrukce. Reakce nabývají hodnot:

$$A = 279\,585\,N$$

$$B = 1.32 \cdot 10^{-10}\,N$$

$$C = 4.09 \cdot 10^{-11}\,N$$

$$D = -1.35 \cdot 10^{-10}\,N$$

$$M_1 = -5.97 \cdot 10^{-7}\,N \cdot mm = -5.97 \cdot 10^{-10}\,N \cdot m$$

$$M_2 = 1.06 \cdot 10^{-7}\,N \cdot mm = 1.06 \cdot 10^{-10}\,N \cdot m$$

Kromě výsledku reakce A lze výsledky ostatních reakcí považovat za nulové vzhledem ke své minimální velikosti.

4.4. Napětí

Z výsledných reakcí ve vazbách je patrné, že konstrukce bude na nosníku s průřezem A-A v námi zvoleném počítaném zátěžném stavu LC02 namáhána na tlak.

Napětí pro tlak získáme jako podíl síly a plochy, na kterou síla působí, což je v našem případě plocha průřezu nosníku A-A. Tento vztah platí za předpokladu, že síla působí na přímce procházející osou stlačovaného tělesa, jeho průřez se nemění a dále napětí je rozloženo po průřezu rovnoměrně.

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{S} = \frac{\frac{1}{2}F_{G_{YC}}}{b \cdot h_1 - (b - 2t_1) \cdot (h - 2t_2)} = \\ &= \frac{279\,585}{400 \cdot 620 - (400 - 2 \cdot 25) \cdot (620 - 2 \cdot 20)} = \mathbf{6,213\,MPa} \quad (4.4.1)\end{aligned}$$

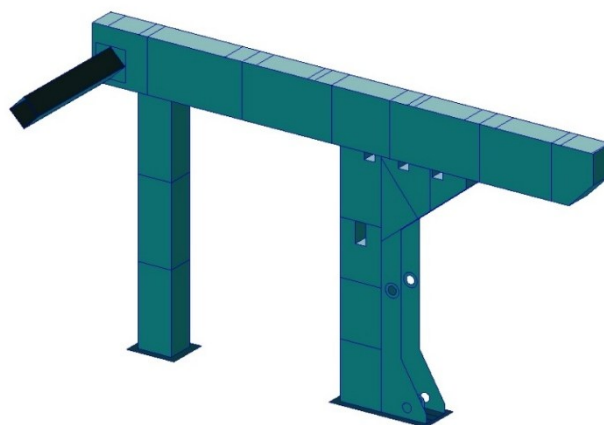
5. VÝPOČET METODOU MKP – PATRAN

Jak bylo již nastíněno v úvodu, byla konstrukce řešena také pomocí Metody konečných prvků. Z pestré palety výpočetních programů, které jsou v dnešní době dostupné na trhu, byl zvolen pro analýzu konstrukce **PATRAN 2014.1** jako primární software s řešičem **NASTRAN 2014.1** od firmy *MSC Software Corporation*. Dále byla konstrukce řešena v rámci vyučování předmětu MKP Výpočty, který se zabývá praktickou výukou softwarového balíčku **ANSYS**, jako zápočtový projekt. V tomto případě byl použit ANSYS s prostředím **Workbench 18.0**. Tento projekt byl také následně použit v této bakalářské práci a je prezentován v následující kapitole č. 6. Nejprve bude probráno zpracování úlohy v jednotlivých softwarech. Poté budou prezentovány výsledky obou výpočtů.

Nosná konstrukce se skládá z několika nosníků, které při výrobě vzniknou svařením plechů různých tloušťek. Pokud bychom chtěli úlohu řešit pomocí objemových prvků, museli bychom použít v tloušťce plechu minimálně 3 objemové prvky, abychom obdrželi přijatelné relevantní výsledky. Vzhledem k velikosti konstrukce by tak výsledný počet konečných prvků narostl do vysokých čísel a vzrostla by rovněž časová náročnost výpočtu. Proto bylo využito plošných prvků SHELL, jenž jsou určeny pro modelování plošných součástí s relativně malou tloušťkou vzhledem k celkovým rozměrům. V modelu se zobrazí jako plošné prvky bez tloušťky. Tloušťka prvku je definována zvlášť pomocí jeho reálné konstanty. V modelu tak nemusíme zohledňovat minimální počet alespoň tří objemových prvků na tloušťku materiálu a použijeme pouze jeden skořepinový, čímž dojde k výraznému zjednodušení náročnosti úlohy.

5.1. Tvorba geometrického modelu

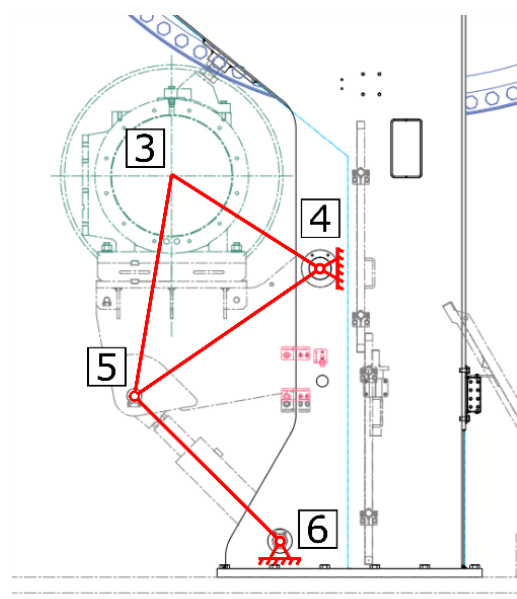
Firmou Papcel byla dodána pouze výkresová dokumentace, a proto bylo nutné prvně vytvořit geometrický model konstrukce. Ten byl vytvořen na základě zmíněné dokumentace za pomoci ploch, jež budou později vysítovány. Bylo využito symetrie úlohy a byla vymodelována pouze symetrická polovina konstrukce, která bude při výpočtu použita.



Obrázek 11 – Vytvořený geometrický model konstrukce v Patranu

Při tvorbě modelu byla snaha dodržet, aby se plochy modelu nacházely ve střednicích reálných plechů. To se ovšem z důvodu pozdější návaznosti sítě nepovedlo úplně všude dodržet, avšak jedná se pouze o posun o pár desítek milimetrů, což je v porovnání s velikostí rozměrů konstrukce v řádech metrů zanedbatelné a na výsledky analýzy by to nemělo mít výrazný vliv. Dále byla při tvorbě modelu provedena určitá zjednodušení geometrie a to zanedbání všech otvorů pro šrouby sloužící k uchycení komponent na konstrukci (motor, kabelové vedení). Tloušťky plechů ležících na sobě (horní dosedací plochy svislých nosníků s hlavním horizontálním nosníkem) byly sečteny a vymodelovány jako plech jeden. Nakonec byly zanedbány zaoblení $R = 200$ nacházející se na hlavním svislém sloupu.

Na konstrukci se dále nachází přítlačný válec s mechanismem pro přítlak. Samotný mechanismus nás při analýze nezajímá, pouze jeho účinek na nosnou konstrukci. Proto byl nahrazen nově vytvořeným mechanismem složeným z prutových prvků, jenž jsou pomocí modulu pružnosti definovány jako tuhé. Hlavní trojúhelníková část vznikla spojením středu přítlačného válce (na obrázku 12 se jedná o pozici [3]) s bodem ležícím ve středu mezi otvory pro čepy na konstrukci (pozice [4]) a dále s otvorem pro čep hydraulického pístu (pozice [5]). Nakonec byly spojeny středy otvorů pro uchycení hydraulického pístu (pozice [5] a [6]). Vzniklý mechanismus je vyobrazen na již zmíněném obrázku 12.



Obrázek 12 – Schematický znázorněné nahrazení přítlačného válce prutovým mechanismem

5.2. Materiálové vlastnosti

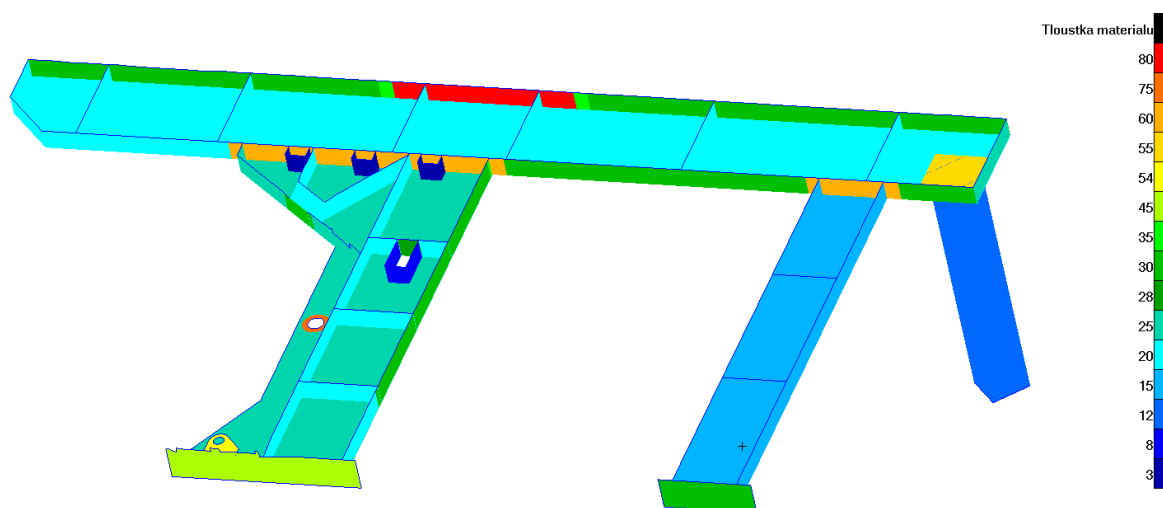
Konstrukce se skládá z plechů různých tlouštěk, které tvoří následující materiál. Jeho materiálové vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Materiál oceli	Veličina	Jednotka	Hodnota
1.4541	$R_{p0,2}$	[MPa]	200
	R_m	[MPa]	610
	μ	[–]	0,3
	ρ	[kg · m ⁻³]	7900
	E	[MPa]	2,0.10 ⁵

Tabulka 5.1 – Tabulka materiálových vlastností

5.3. Tvorba konečno-prvkového modelu

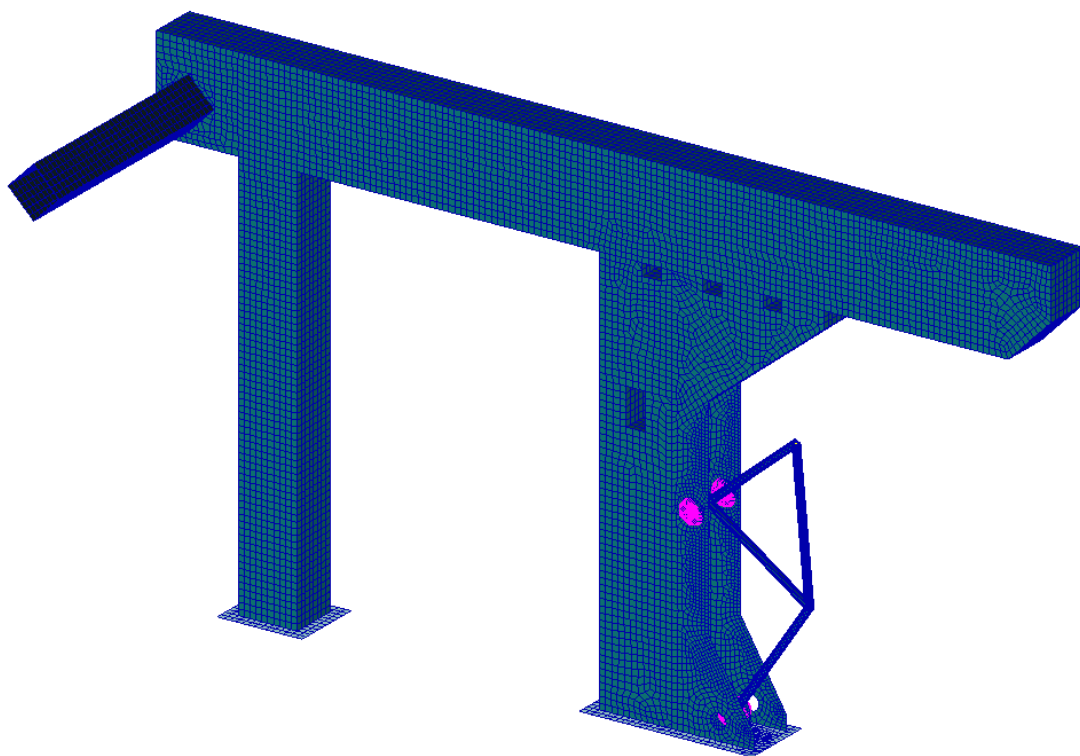
Jednotlivým plochám modelu byly přiřazeny příslušné tloušťky materiálu dle dodané výkresové dokumentace. Použité tloušťky a místa jejich aplikací můžeme vidět na obrázku 13, na kterém byla konstrukce rozříznuta tak, aby šlo vidět i dovnitř. Následně byl celý geometrický model vysítován pomocí tříuzlových a čtyřuzlových shell elementů bez meziuzlů, kde výchozí velikost jednotlivých prvků byla nastavena na 50 mm. Následně po vykreslení sítě bylo provedeno několik úprav, aby síť byla jemnější v místě otvorů, kde dojde k uchycení mechanismu přitlačného válce. V místě [4] dle obrázku 12 bylo aplikován předpis, aby se po obvodu otvoru nacházelo 30 elementů a v případě místa [6] 20 elementů po obvodu otvoru. Mechanismus přitlačného válce byl vysítován pomocí prutových elementů s kruhovým průřezem o poloměru 30 mm.



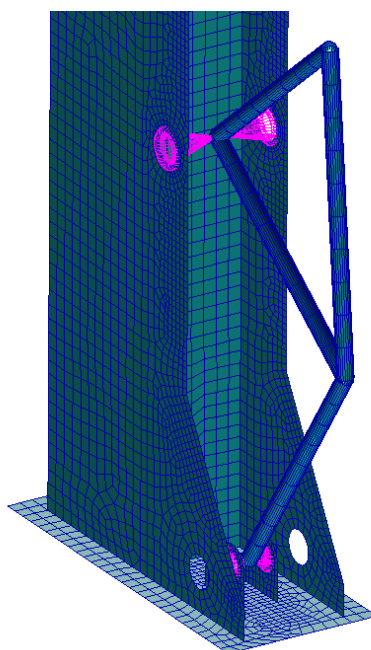
Obrázek 13 – Aplikované tloušťky jednotlivých plechů

Na obrázku 12 bylo schematicky znázorněno uchycení mechanismu ve dvou místech pomocí kloubové vazby. Nyní bylo nutné tyto vazby vytvořit, aby model při výpočtu fungoval, jelikož mechanismus přitlačného válce nebyl stále s konstrukcí propojen. Toho bylo docíleno pomocí prvku MPC RBE2. Pomocí tohoto prvku jsme schopni svázat posuvy podřízených uzlů s uzlem řídícím, kdy na řídícím uzlu definujeme stupně volnosti a ty jsou poté aplikovány i u uzlů podřízených. V tomto případě došlo ke svázání posuvů ve směru osy x a y, avšak možnost natočení zůstala. Pro první vazbu byl jako řídící uzel vybrán koncový uzel na prutovém mechanismu v místě [6] (na obrázku 12), který byl svázán s uzly nacházejícími se na obvodu otvorů pro uložení hydraulického pístu v témže místě na konstrukci. Stejné řešení bylo aplikováno v místě [4], kdy se řídícím uzlem stal uzel mechanismu ležící ve vrcholu „trojúhelníku“. Tento uzel byl poté svázán s uzly tvořící obvod otvorů pro čepy na konstrukci.

Na obrázku 14 pak můžeme vidět výsledný konečno-prvkový model předtím, než na něj byly aplikovány okrajové podmínky.



Obrázek 14 – Výsledný konečno-prvkový model konstrukce v Patranu



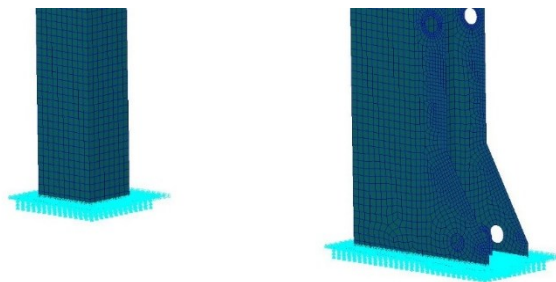
Obrázek 15 – Detail na uchycení mechanismu přítláčeného válce na konstrukci

5.4. Aplikované okrajové podmínky

Až doposud se řešila pouze geometrie modelu. Nyní bylo nutné zadat okrajové podmínky a to zatížení a uložení/ukotvení modelu. V této podkapitole si tyto aplikované okrajové podmínky jednotlivých zátěží, které byly podrobněji popsány a probrány v kapitole číslo 3, rozebereme.

5.4.1. Vetknutí/Uložení

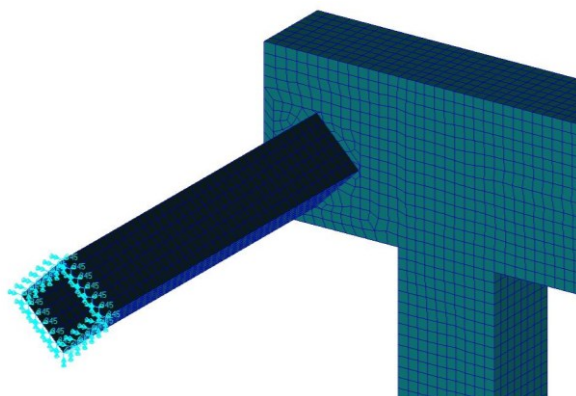
Vetknutím jsme odebrali stupně volnosti modelu tak, aby se nemohl při výpočtu pohybovat jako celek. Dosedacím plochám svislých nosníků, jenž mají být přišroubovány k betonovému podkladu, byly v jednotlivých uzlech odebrány posuvy ve směru všech os a rovněž natočení kolem všech os.



Obrázek 16 – Vetknutí konstrukce

5.4.2. Symetrie

Jelikož byla při tvorbě modelu využita symetrie konstrukce a byla vytvořena pouze jedna její polovina, bylo nutné aplikovat okrajové podmínky na volný konec nosníku spojující symetrické poloviny konstrukce. Okrajová podmínka symetrie je definována pomocí posuvů a rotace, kdy byla uzlům ležících v rovině symetrie odebrána možnost posunutí v normálovém směru k rovině symetrie. Dále tyto uzly mají nulové natočení k osám, jenž leží v rovině symetrie.



Obrázek 17 – Okrajové podmínky symetrie

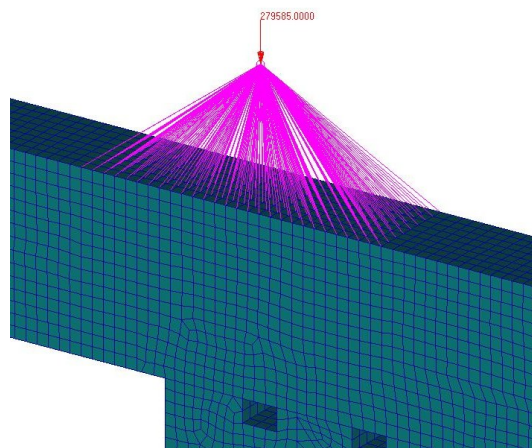
Při aplikaci dalších okrajových podmínek pro zátěž bylo nutno brát v potaz symetrii modelu a zadávat odpovídající podíl z celkové hodnoty zátěže příslušící celému modelu, v tomto případě se jedná o polovinu z uvažované zátěže pro celou konstrukci.

5.4.3. Zatížení LC01 – Tíha konstrukce

Pro celý model bylo aplikováno tíhové zrychlení platné pro zeměpisnou šířku a délku České Republiky o velikosti $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

5.4.4. Zatížení LC02 – Tíha Yankee válce

Yankee válec je na konstrukci umístěn do ložiskového domu, ale ten nebyl v modelu vytvořen. Aby tedy bylo možné aplikovat všechny silové účinky do ložiska (kromě zatížení LC02 zde bude působit LC04), byl nahrazen prvkem MPC RBE3. U tohoto prvku dochází k rozprostření silových účinků do jednotlivých uzlů na základě rovnic rovnováhy a váhového faktoru. Došlo ke svázání uzlů dosedací plochy mezi ložiskovým domem a konstrukcí s řídicím uzlem. Tento uzel vznikl ve středu dosedací obdélníkové plochy a poté byl posunut směrem nahoru o takovou vzdálenost, aby se nacházel ve výšce středu ložiska, kterým prochází osa rotace Yankee válce. Do tohoto uzlu byla poté aplikována zatěžující síla ze stavu LC02. Z důvodu symetrie konstrukce je ovšem její velikost poloviční.



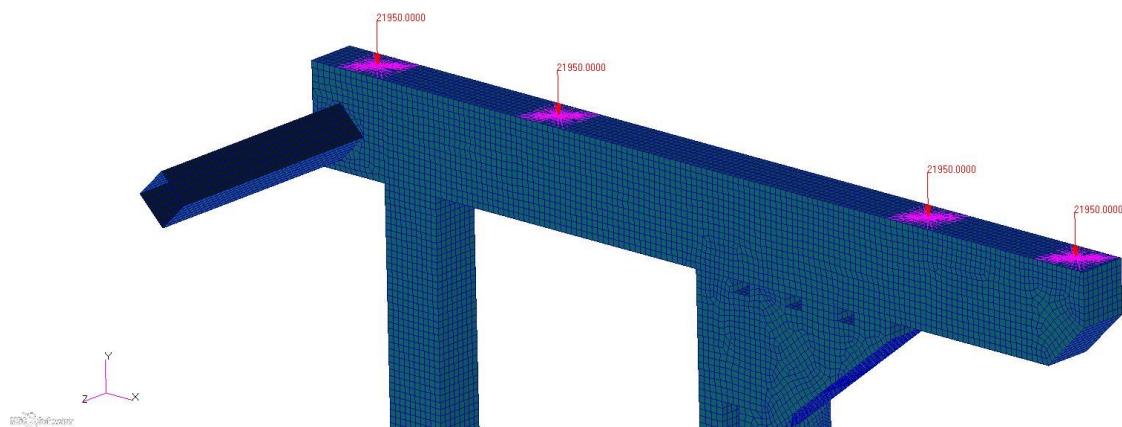
Obrázek 18 – Aplikace tíhové síly Yankee válce

$$F_{G_{YC}} = m_{YV} \cdot g \cdot \frac{1}{2} = 57\,000 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{2} = 279\,585 \text{ N} \quad (5.4.1)$$

5.4.5. Zatížení LC03 – Tíha zákrytu Yankee válce

Kryt je na konstrukci uchycen pomocí menší nosné konstrukce (konstrukce je znázorněna na obrázku 4 v kapitole rozboru zátěží). Ta je s hlavní nosnou konstrukcí sešroubována ve čtyřech dosedacích místech. V těchto místech bude působit tíhová síla ze zátěžného stavu LC03. Rovněž jako v případě aplikace okrajových podmínek LC02 byl použit MPC prvek RBE3, který svázal uzly dosedací plochy s nově vzniklým řídicím uzlem nacházejícím se ve středu každé z dosedajících ploch. Do těchto čtyř uzlů byla aplikována již zmíněná zatěžující síla stavu LC03. Její velikost je opět poloviční z důvodu symetrie konstrukce. Dále se předpokládá rovnoměrné rozdělení zátěže na všechny čtyři dosedací plochy, a proto došlo k rozpočítání této zátěžné síly na čtvrtiny, které byly následně aplikovány do jednotlivých řídicích uzlů.

$$F_{G_C} = (m_{C1} + m_{C2}) \cdot g \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} = (9230 + 8670) \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} = 21\,950 \text{ N} \quad (5.4.2)$$

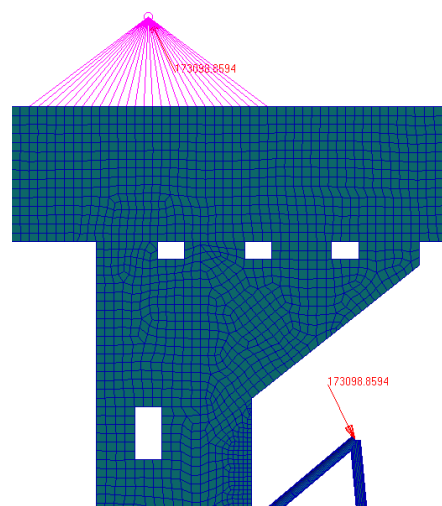


Obrázek 19 – Tíhová síla zákrytů Yankee válce aplikovaná v dosedacích místech pomocné nosné konstrukce

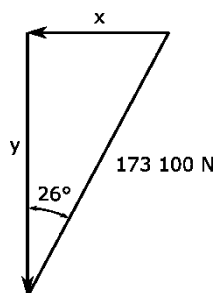
5.4.6. Zatížení LC04 – Přítlačný válec

Jak již bylo nastíněno, přítlačný válec je umístěn na mechanismu, který je uložen na čepu a regulace přítlaku je realizována pomocí hydraulického pístu. V místě styku Yankee válce a přítlačného válce je v zátěžném stavu LC04 hydraulickými písty vyvinut přítlak o velikosti 120kN/m, přičemž válec má šířku 2885 mm. Opět je uvažováno z důvodu symetrie pouze s polovinou zatížení.

Tato vzniklá síla působí na spojnici středů těchto dvou válců. Z principu akce-reakce působí jak na ložisko Yankee válce, tak na ložisko přítlačného válce. Abychom tuto sílu mohli do těchto dvou uzlů aplikovat, bylo nutné sílu rozpočítat na složky osy x a y tak, aby síla působila ve stejném směru jako spojnice středů válců. Na základě výkresové dokumentace bylo zjištěno, že spojnice středů ložisek svírá s osou y úhel 26°.



Obrázek 20 – Síly od přítlačného válce působící v ložisku Yankee válce a přítlačného válce



Obrázek 21 – Rozklad síly zatížení LC04 na složky x a y

$$F_{PC} = F_1 \cdot l \cdot \frac{1}{2} = 120\,000 \cdot 2885 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{2} = \mathbf{173\,100\,N} \quad (5.4.3)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= 173\,100 \cdot \sin 26^\circ = \mathbf{75\,882\,N} \\ y &= 173\,100 \cdot \cos 26^\circ = \mathbf{155\,581\,N} \end{aligned} \right\} \quad (5.4.4)$$

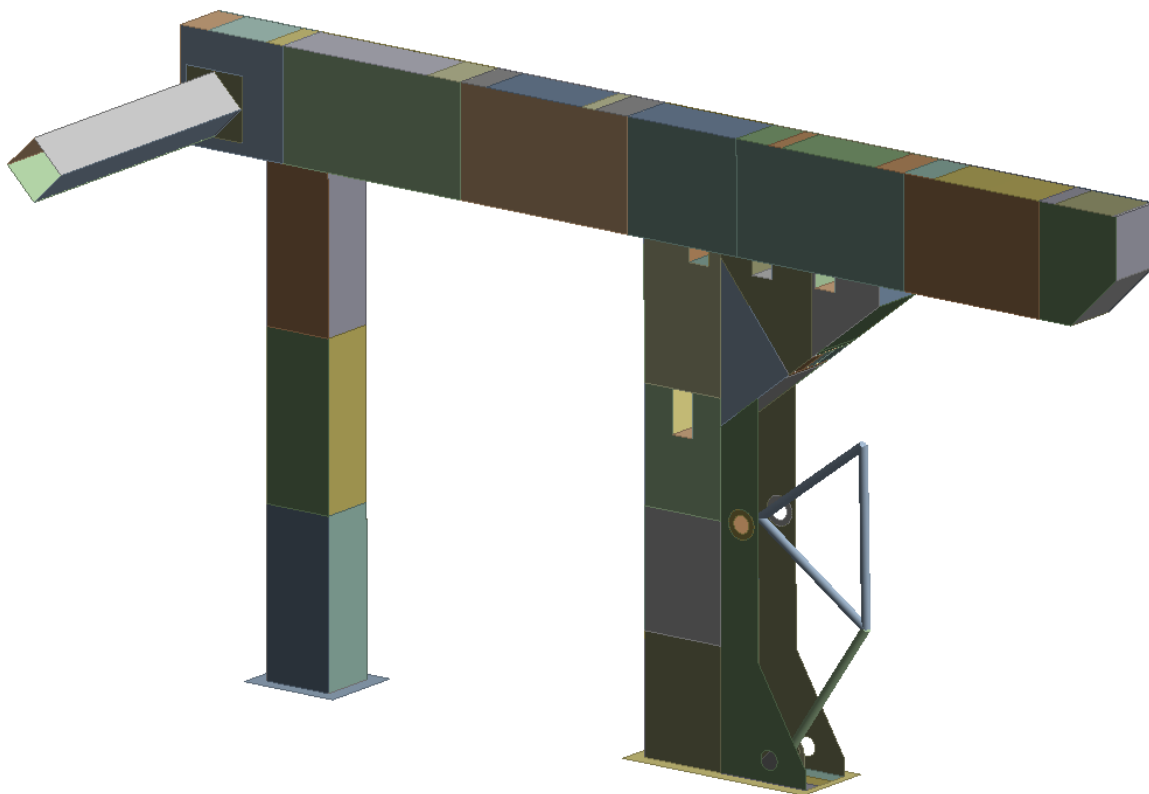
6. VÝPOČET METODOU MKP – ANSYS

Jak již bylo zmíněno v úvodu předchozí kapitoly, úloha byla řešena rovněž pomocí softwaru ANSYS v prostředí **Workbench 18.0**. Při vypracování byla snaha dodržet postup, který byl použit při řešení úlohy v Patranu.

6.1. Tvorba geometrického modelu

Geometrický model již nebyl znovu tvořen a bylo využito možnosti exportovat geometrii z předchozího výpočtu v softwaru Patran. Pro export byl použit souborový formát STEP, kdy byly z modelu vyexportovány plochy, které byly následně importovány do prostředí Design Modeleru v Ansysu.

Následně byl opět vymodelován prutový mechanismus nahrazující mechanismus přítlačného válce. Byl použit postup zmíněný v podkapitole 5.1.



Obrázek 22 – Geometrický model pro výpočet v Ansysu

6.2. Tvorba konečno-prvkového modelu

Jako první byly nastaveny materiálové parametry. Vlastnosti materiálu byly použity stejné jako v případě Patranu podle tabulky 5.1. Dále bylo nutné opět aplikovat příslušné tloušťky jednotlivým plochám modelu konstrukce. Při síťování byl pak na geometrický model aplikován globální předpis velikosti sítě 50 mm. Lokálně pak byl aplikován předpis opět v místě okrajů otvorů pro čepy přitlačného mechanismu, kde byl nastaven počet elementů na 30.

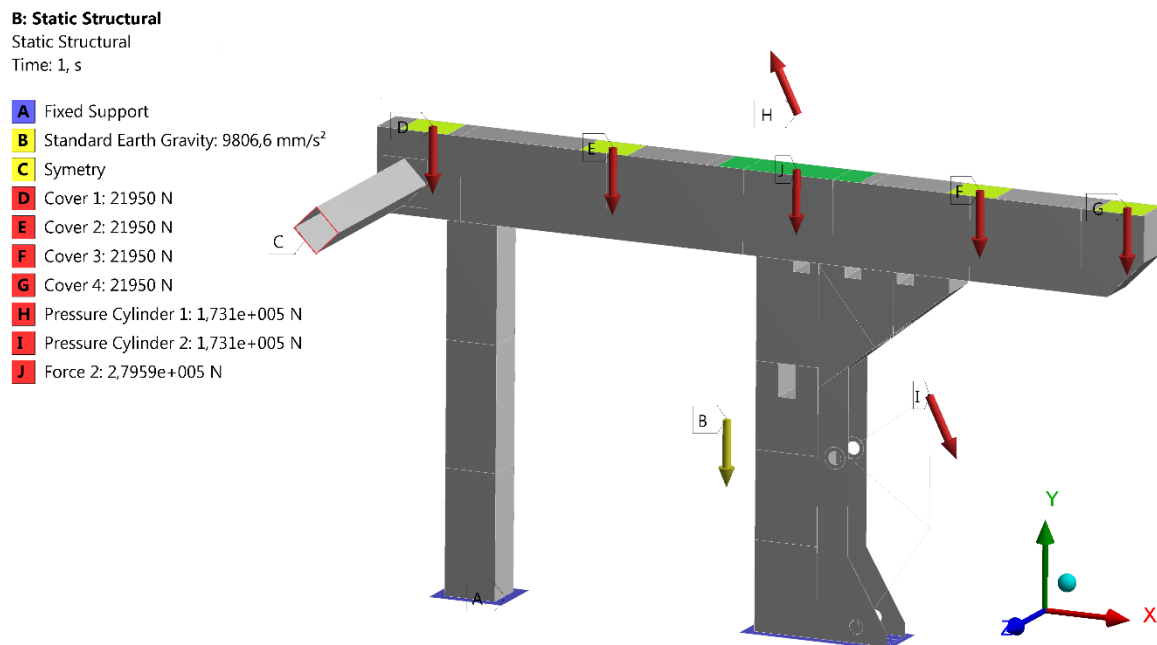
Opět pro funkčnost prutového mechanismu bylo nutné propojení s konstrukcí. Pro tento účel bylo v kontaktech vybráno možnosti kloubové vazby, která umožňuje natočení. Tyto klouby byly aplikovány do stejných míst jako prvky MPC RBE2 zmíněné v podkapitole 5.3.



Obrázek 23 – Výsledný konečno-prvkový model konstrukce v Ansysu

6.3. Aplikované okrajové podmínky

Pro řešení úlohy v Ansysu byly aplikovány okrajové podmínky ve stejných místech a o stejných velikostech, jako bylo probráno v podkapitole 5.4 při výpočtu pomocí Patranu. Namísto MPC prvků byla v Ansysu využita možnost použít Remote Forces.



Obrázek 24 – Aplikované okrajové podmínky v softwaru Ansys

Aplikované okrajové podmínky:

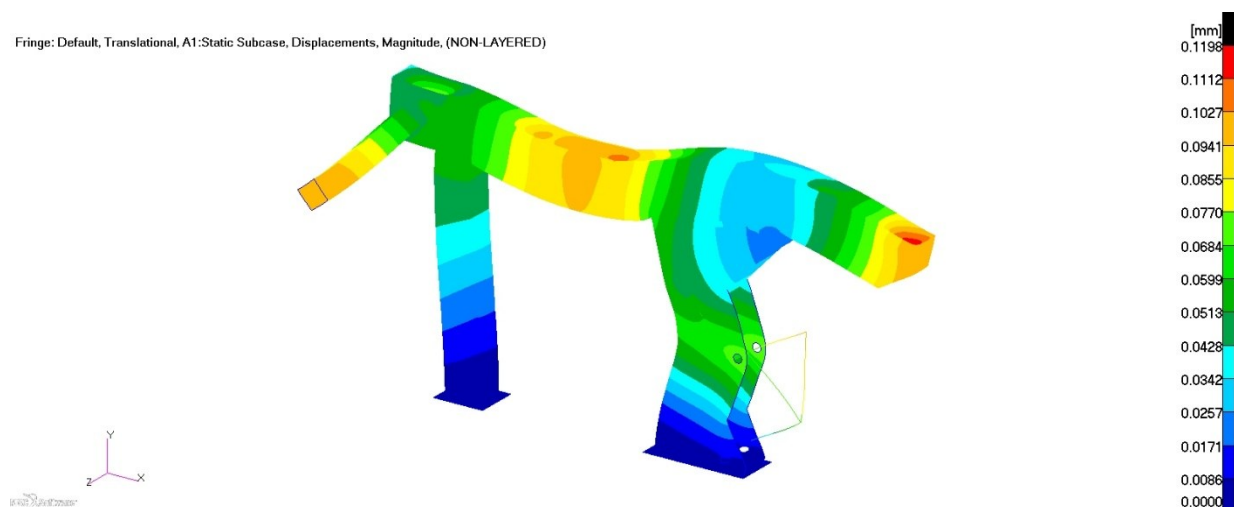
Značení	Popis
A	Ukotvení modelu konstrukce
B	Tíhové zrychlení.
C	Symetrie – zakázán posuv ve směru osy z a rotace kolem osy x a y
D E F G	Tíha zákrytu Yankee Válce
I H	Přítlačná síla přítlačného válce
J	Tíha Yankee válce

7. VÝSLEDKY VÝPOČTŮ POMOCÍ METODY MKP

V této kapitole budou nejprve probrány výsledky pro případ zatížení konstrukce všemi zátěžnými stavy LC01 až LC04 současně, následně pak výsledky pro jednotlivé zátěžné stavy. Na horní části stránky se bude vždy nacházet výsledek získaný pomocí softwaru Patran, na druhé polovině stránky poté výsledek získaný v Ansysu. Pro vykreslení redukovaného napětí byla použita hypotéza von Mises.

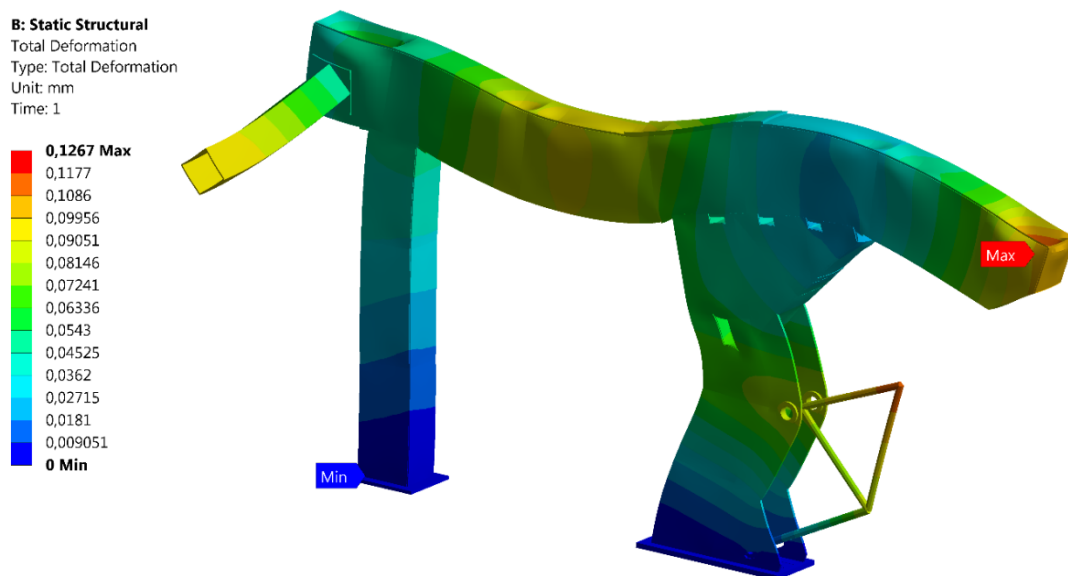
7.1. Celkové posunutí při kombinovaném zatížení LC01 až LC04

K maximálnímu posunu dochází v dosedacím místě pomocné nosné konstrukce pro zákryt Yankee válce ve přední části konstrukce. Velikost posunu je rovna $0,1198 \text{ mm}$.



Obrázek 25 – PATRAN – Deformace na konstrukci zatížené stavy LC01 až LC04

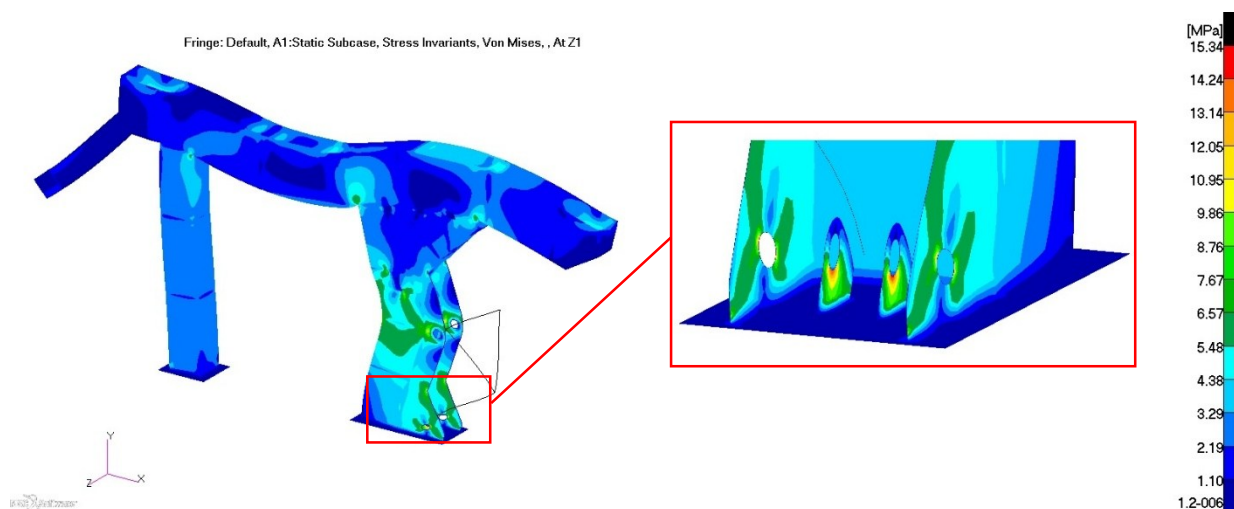
Rovněž v případě Ansysu k maximálnímu posunutí dochází ve stejném místě. Velikost posunu je $0,12671 \text{ mm}$. Což je 5,77% rozdíl v porovnání s Patranem.



Obrázek 26 – ANSYS – Deformace na konstrukci zatížené stavy LC01 až LC04

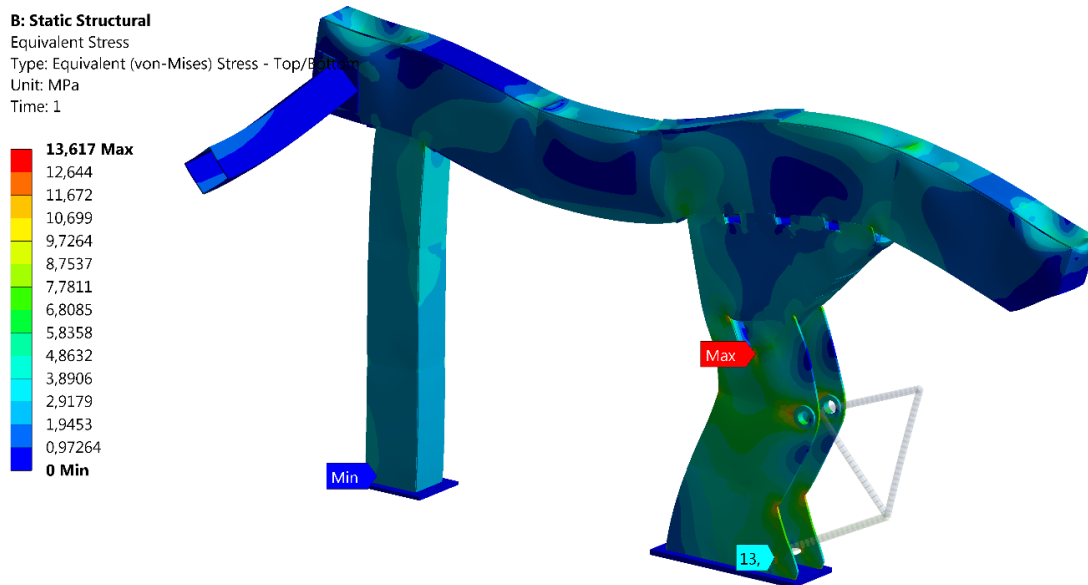
7.2. Redukované napětí při kombinovaném zatížení LC01 až LC04

K maximálnímu redukovanému napětí dochází v označeném místě, kde jsou otvory pro uložení hydraulických válců. Hodnota tohoto redukovaného napětí je $15,34 \text{ MPa}$.



Obrázek 27 – PATRAN – Redukované napětí na konstrukci zatížené stavy LC01 až LC04

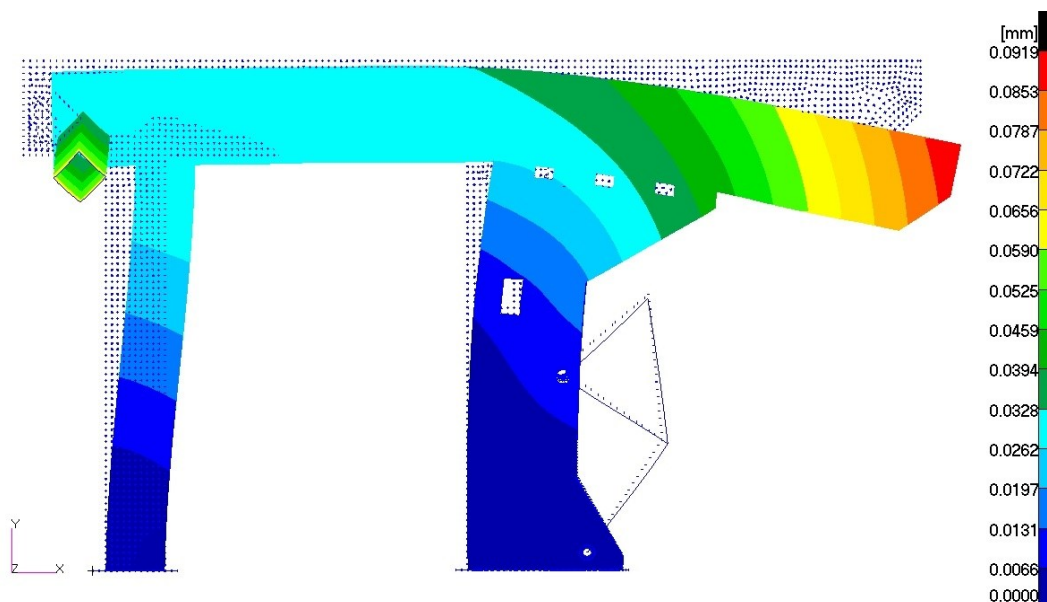
Při výpočtu pomocí Ansysu vyšlo maximální redukované napětí v místě označeném štítkem MAX a nabývá hodnoty $13,617 \text{ MPa}$. Rozložení napětí vyšlo velice podobně jako v případě Patranu.



Obrázek 28 – ANSYS – Redukované napětí na konstrukci zatížené stavy LC01 až LC04

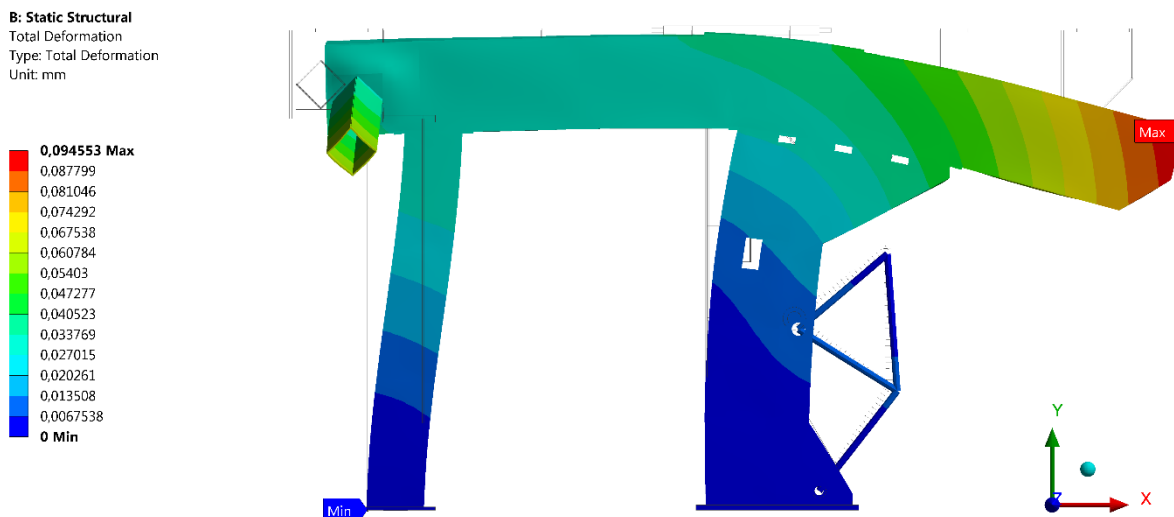
7.3. Celkové posunutí při zatížení LC01

Pokud na konstrukci působí pouze zemská tíha, dochází k poklesu přední koncové části horizontálního nosníku. V tomto místě dochází k poklesu o $0,0919\text{ mm}$. K dalšímu výraznějšímu poklesu dochází poté ve středu nosníku spojujícího symetrické poloviny konstrukce.



Obrázek 29 – PATRAN – Deformace na konstrukci zatížené stavem LC01

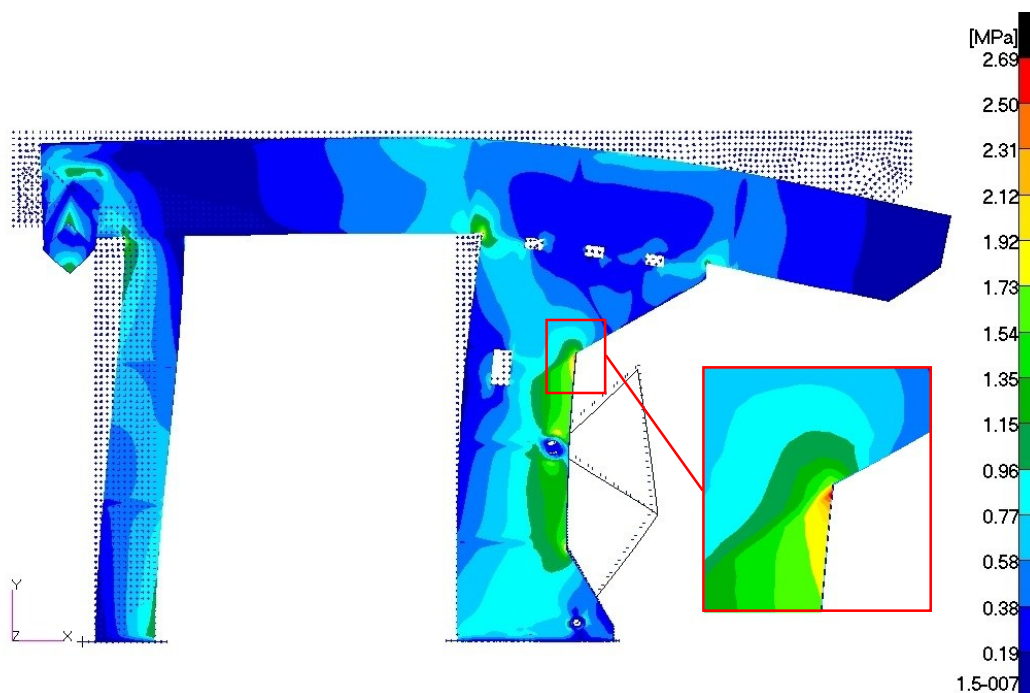
V případě Ansysu došlo k poklesu v témže místě o přibližně stejnou hodnotu. Rozdíl oproti Patranu činí 2,89%.



Obrázek 30 – ANSYS – Deformace na konstrukci zatížené stavem LC01

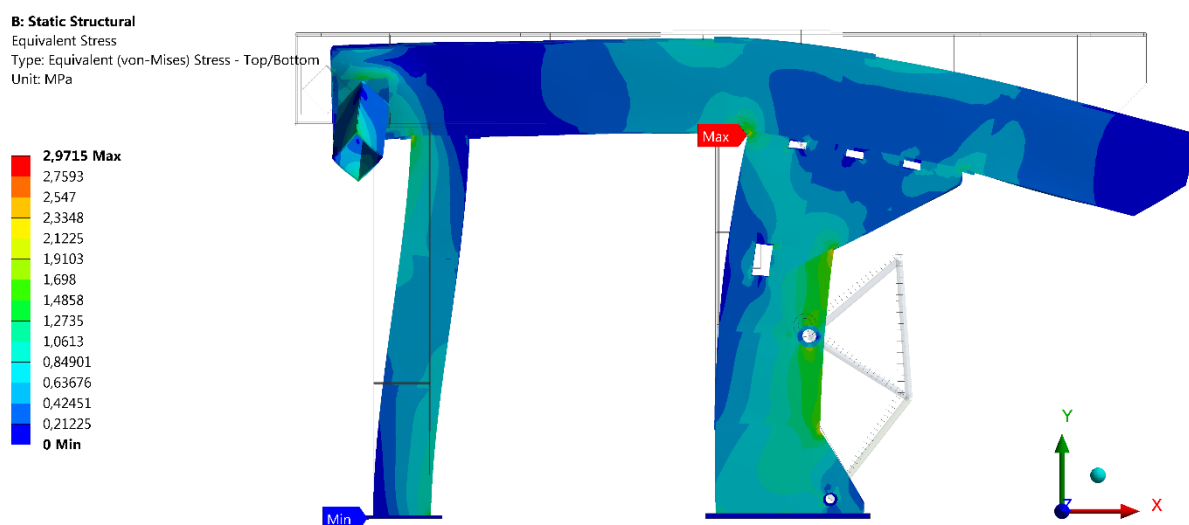
7.4. Redukované napětí při zatížení LC01

Ke koncentraci napětí dochází v místě, kde byla při tvorbě modelu provedena úprava. V tomto místě nebylo vymodelováno zaoblení o poloměru 200 mm, proto se zde nachází ostrý přechod s vrubovým účinkem. Vzhledem k tomu, že se jedná o malou hodnotu (2,69 MPa), není třeba model přepracovat. Pokud by došlo k přepracování a vymodelování zaoblení, došlo by lepším rozložení napětí a jeho poklesu.



Obrázek 31 – PATRAN – Redukované napětí na konstrukci zatížené stavem LC01

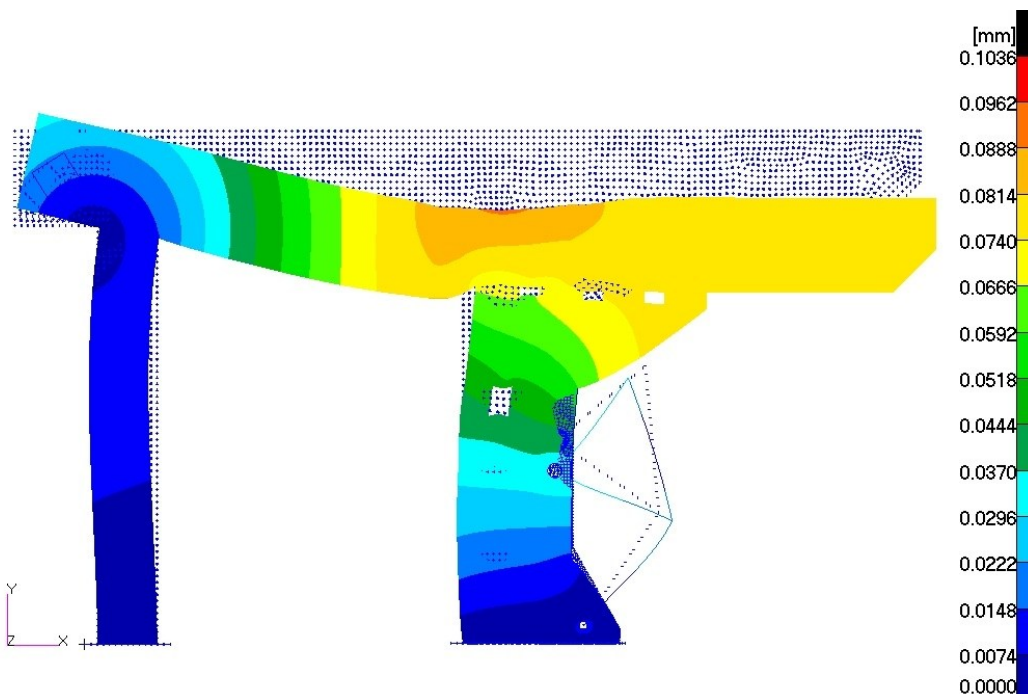
V případě Ansysu se maximum vyskytlo na rozhraní hlavního vertikálního nosníku s nosníkem horizontálním. Je mírně vyšší a to 3,9715 MPa.



Obrázek 32 – ANSYS – Redukované napětí na konstrukci zatížené stavem LC01

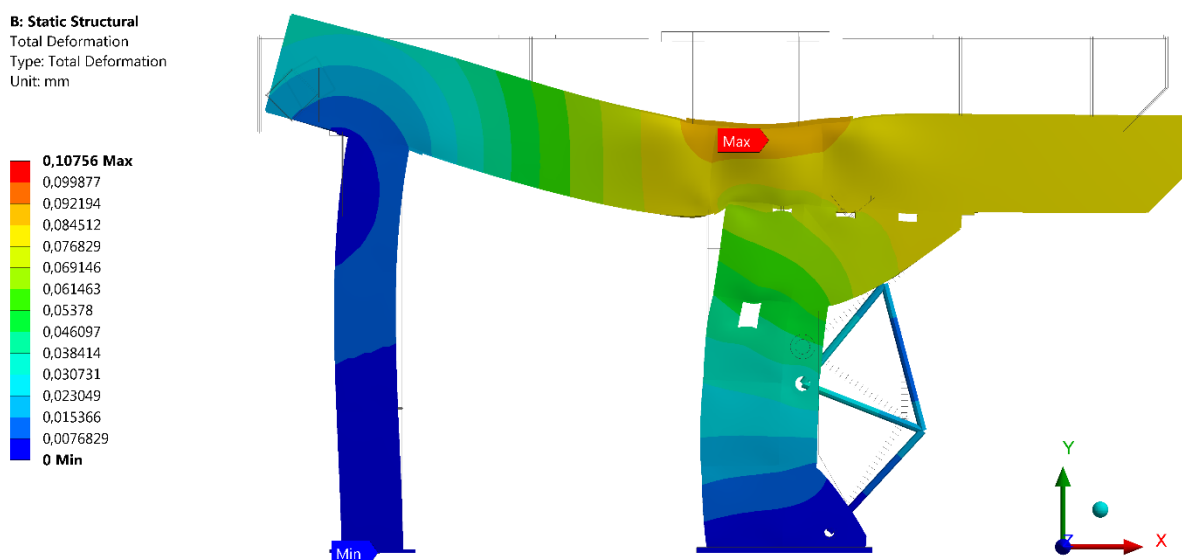
7.5. Celkové posunutí při zatížení LC02

Pokud na konstrukci působí pouze tíha Yankee válce, dochází ke stlačení hlavního vertikálního nosníku. K největší deformaci dochází v místě přibližného středu dosedací plochy ložiskového domu. Jedná se o 0,1036 mm.



Obrázek 33 – PATRAN – Deformace na konstrukci zatížené stavem LC02

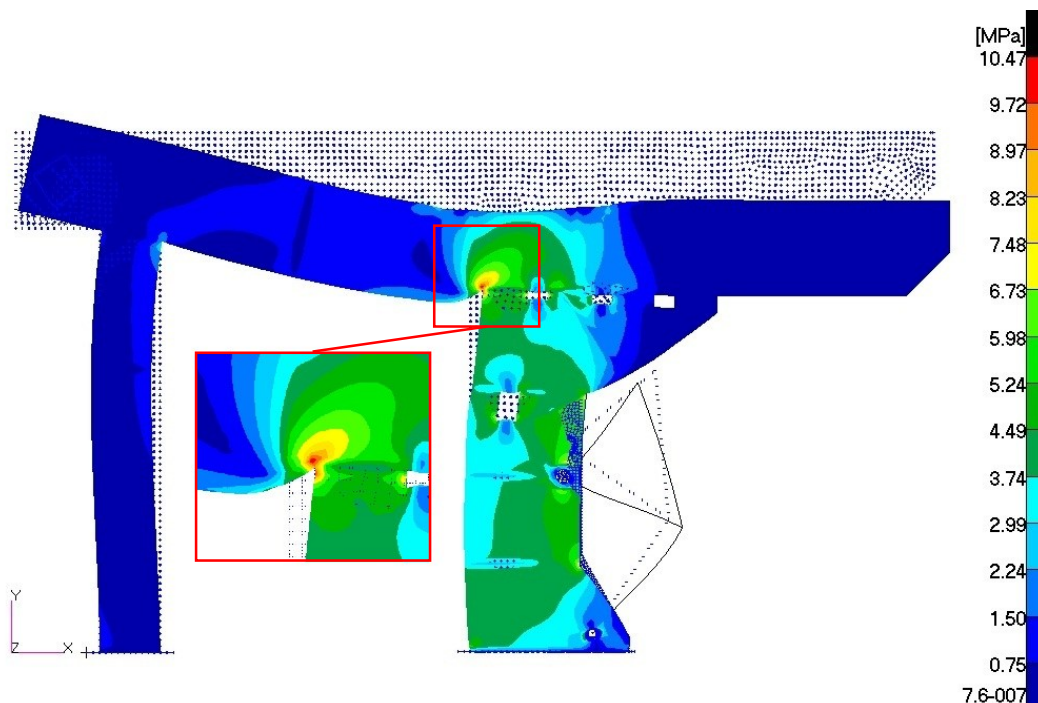
Ke stejnému výsledku dojde i v případě Ansysu, kde k poklesu dochází v identickém místě a hodnota deformace činí 0,10756 mm, což je rozdíl 3,82% v porovnání s Patranem.



Obrázek 34 – ANSYS – Deformace na konstrukci zatížené stavem LC02

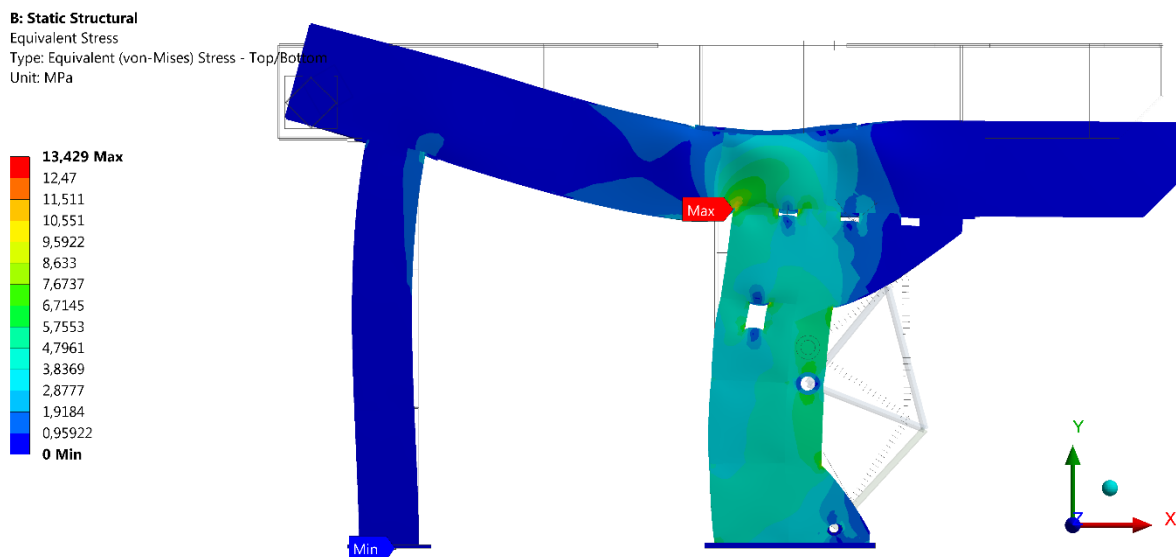
7.6. Redukované napětí při zatížení LC02

Ke koncentraci napětí dochází v případě zatížení Yankee válcem v místě přechodu horizontálního nosníku s hlavním vertikálním. Velikost tohoto redukovaného napětí je 10,47 MPa.



Obrázek 35 – PATRAN – Redukované napětí na konstrukci zatížené stavem LC02

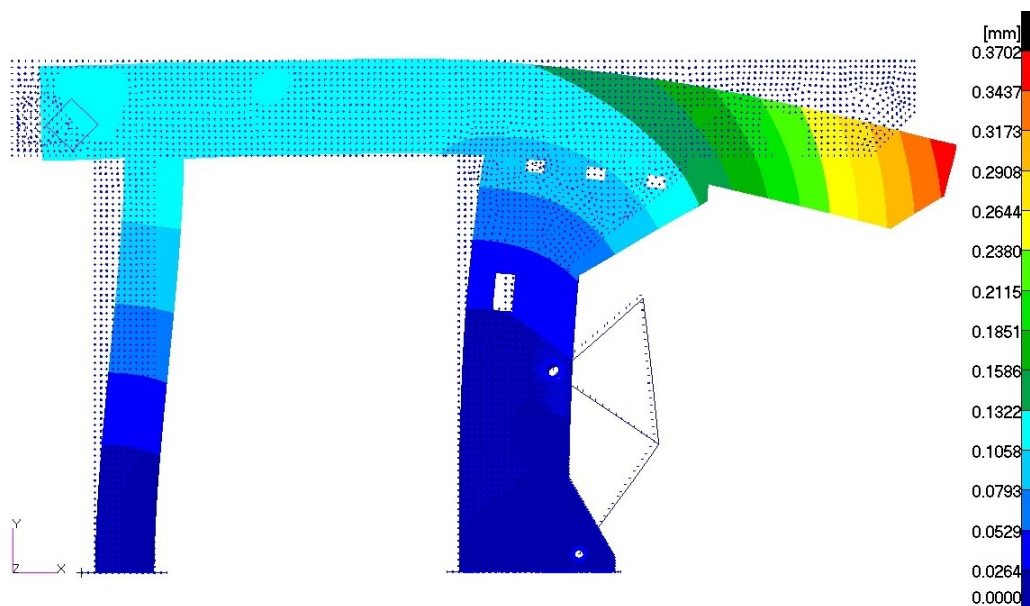
V případě Ansysu redukované napětí ještě částečně vzrostlo na 13,429 MPa.



Obrázek 36 – ANSYS – Redukované napětí na konstrukci zatížené stavem LC02

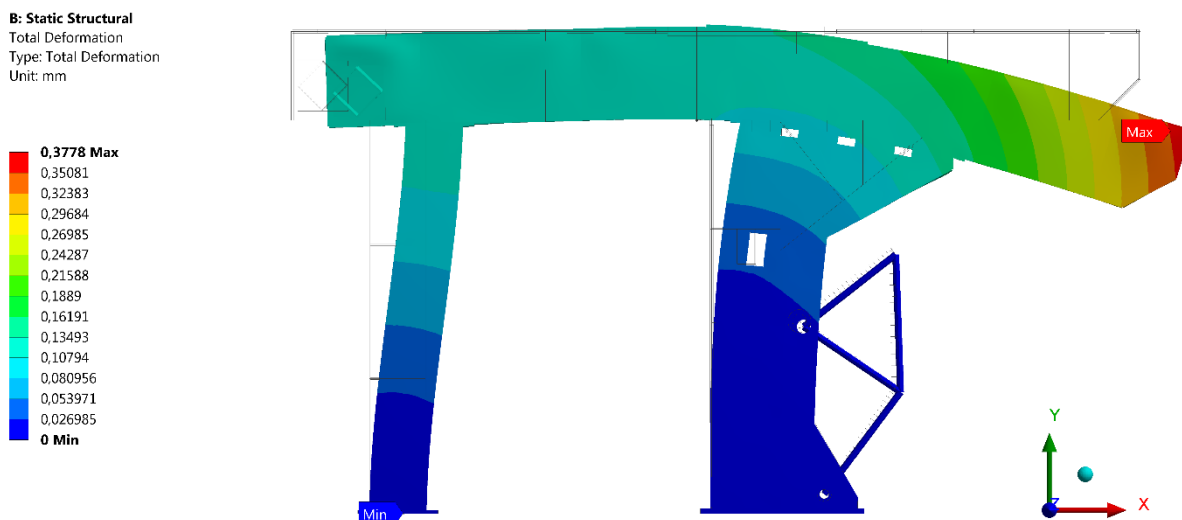
7.7. Celkové posunutí při zatížení LC03

Při působení účinku LC03, kdy je konstrukce zatěžována tíhou zákrytu Yankee válce, dojde stejně jako v případě zatížení konstrukce vlastní tíhou k poklesu předního konce horizontálního nosníku. Avšak v tomto případě je pokles mnohonásobně větší. Dojde k poklesu o $0,3702\text{ mm}$.



Obrázek 37 – PATRAN – Deformace na konstrukci zatížené stavem LC02

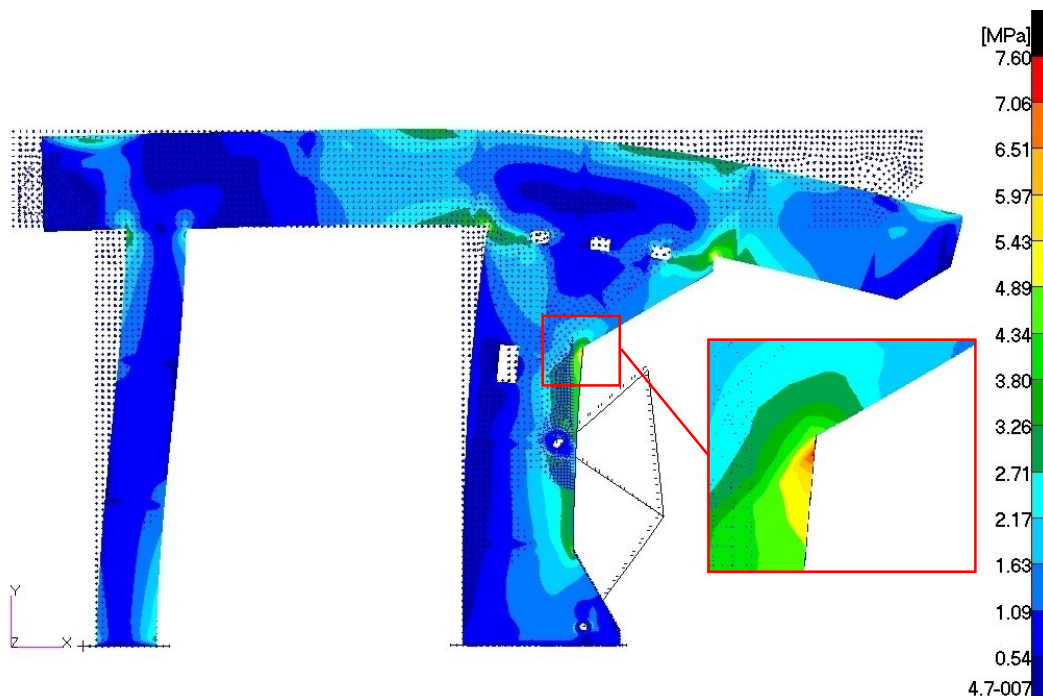
Při výpočtu pomocí Ansysu došlo ke stejnému způsobu deformace, kdy přední konec poklesl o $0,3778$, což se v porovnání s Patranem 2,05% nárůst.



Obrázek 38 – ANSYS – Deformace na konstrukci zatížené stavem LC02

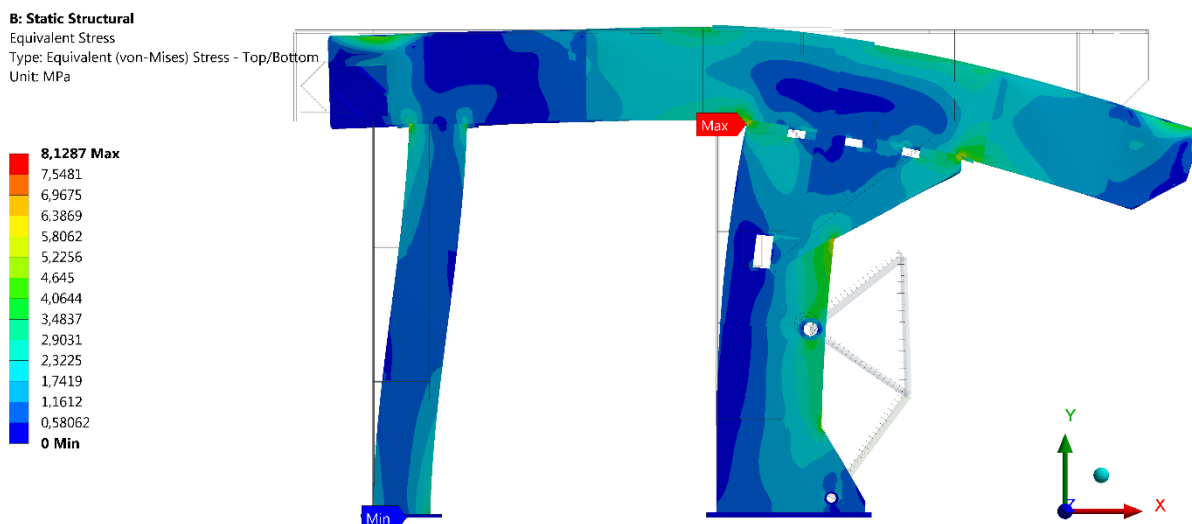
7.8. Redukované napětí při zatížení LC03

Při již zmíněné zátěži konstrukce tíhou zákrytu se zvýšená koncentrace napětí objeví v místě nevymodelovaného zaoblení jako v případě působení tíhového zrychlení na obrázku 31. Redukované napětí dosahuje hodnoty 7,6 MPa.



Obrázek 39 – PATRAN – Redukované napětí na konstrukci zatížené stavem LC02

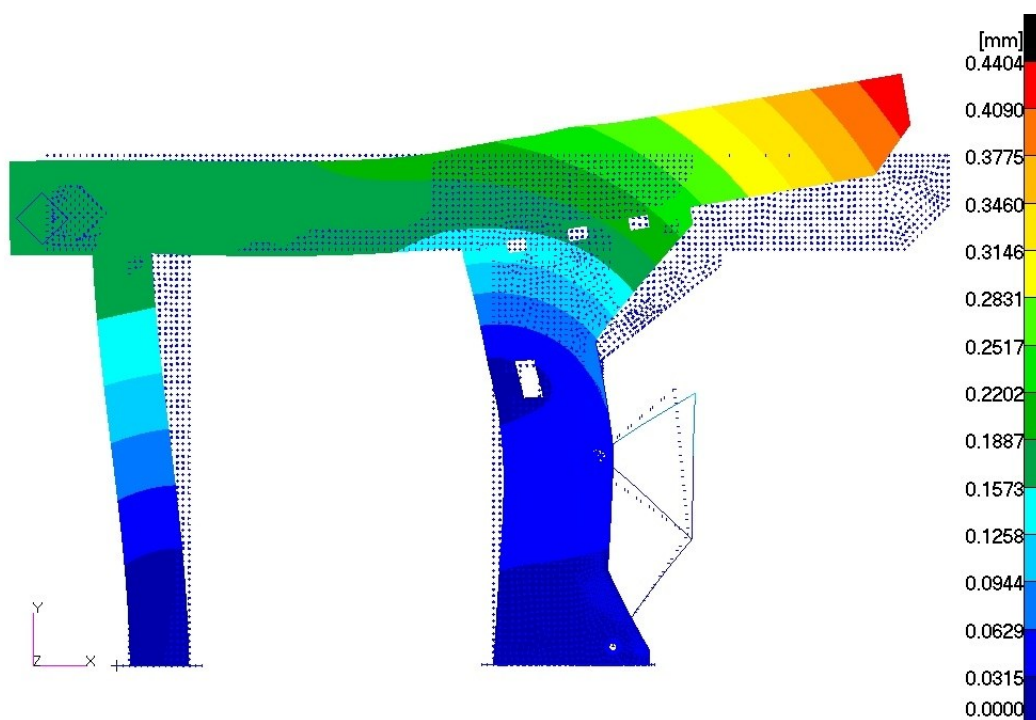
V případě Ansysu se maximum vyskytlo opět na rozhraní hlavního vertikálního nosníku s nosníkem horizontálním a dosahuje 8,1287 MPa.



Obrázek 40 – ANSYS – Redukované napětí na konstrukci zatížené stavem LC02

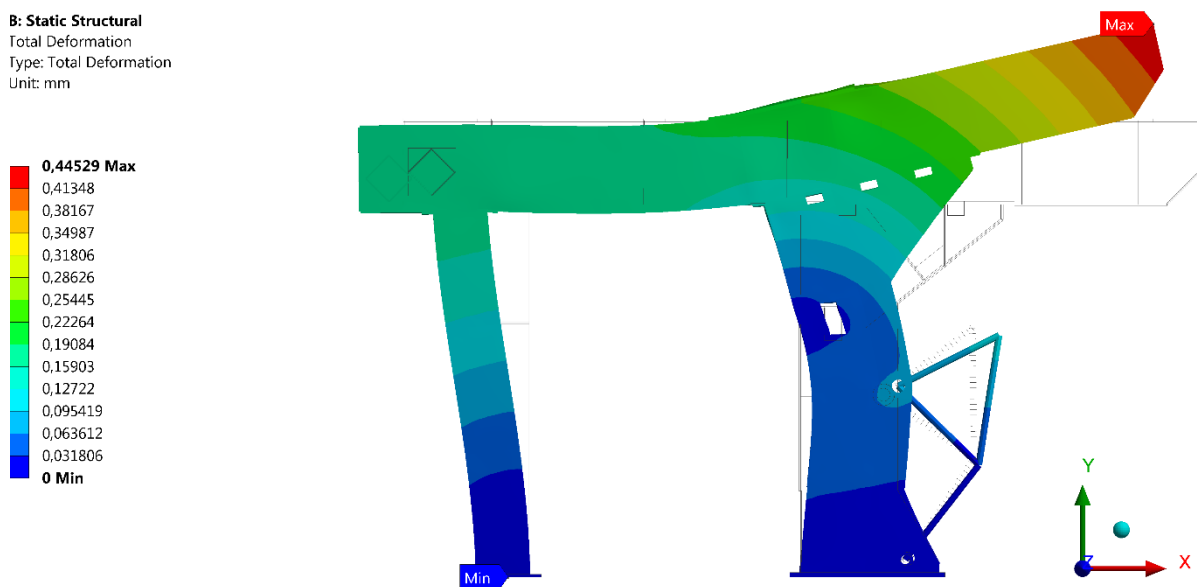
7.9. Celkové posunutí při zatížení LC04

Při namáhání konstrukce mechanismem přitlačného válce dojde k nazdvižení předního konce horizontálního nosníku o 0,4404 mm.



Obrázek 41 – PATRAN – Deformace na konstrukci zatížené stavem LC02

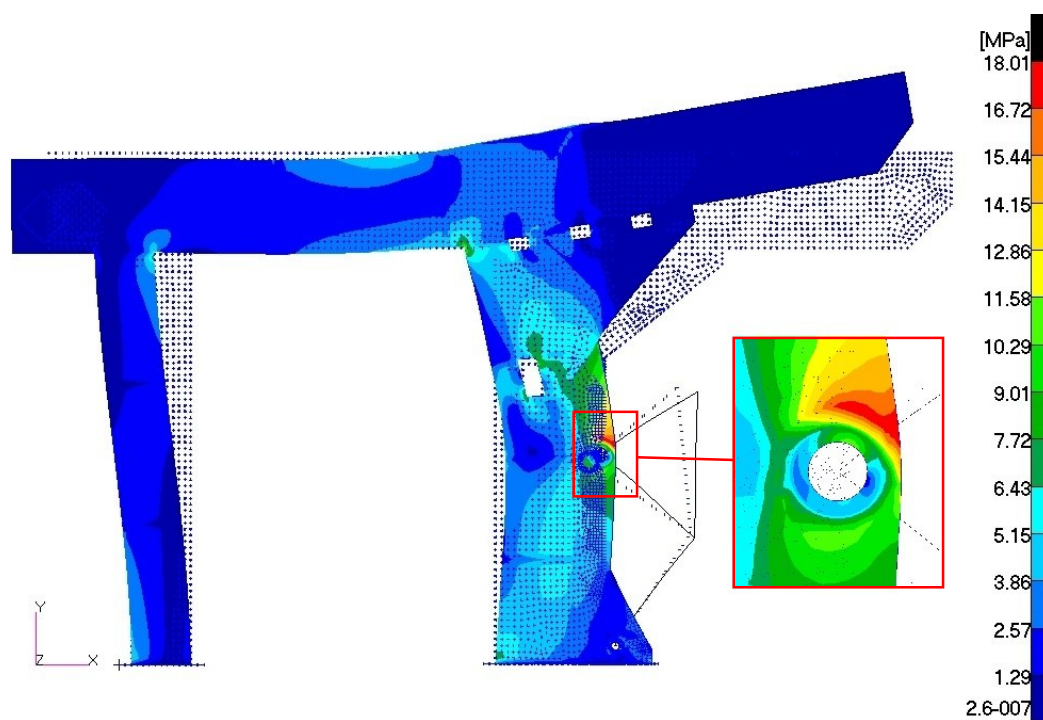
V případě Ansysu je posun podobný, rozdíl oproti Patranu činí 1,1%.



Obrázek 42 – ANSYS – Deformace na konstrukci zatížené stavem LC02

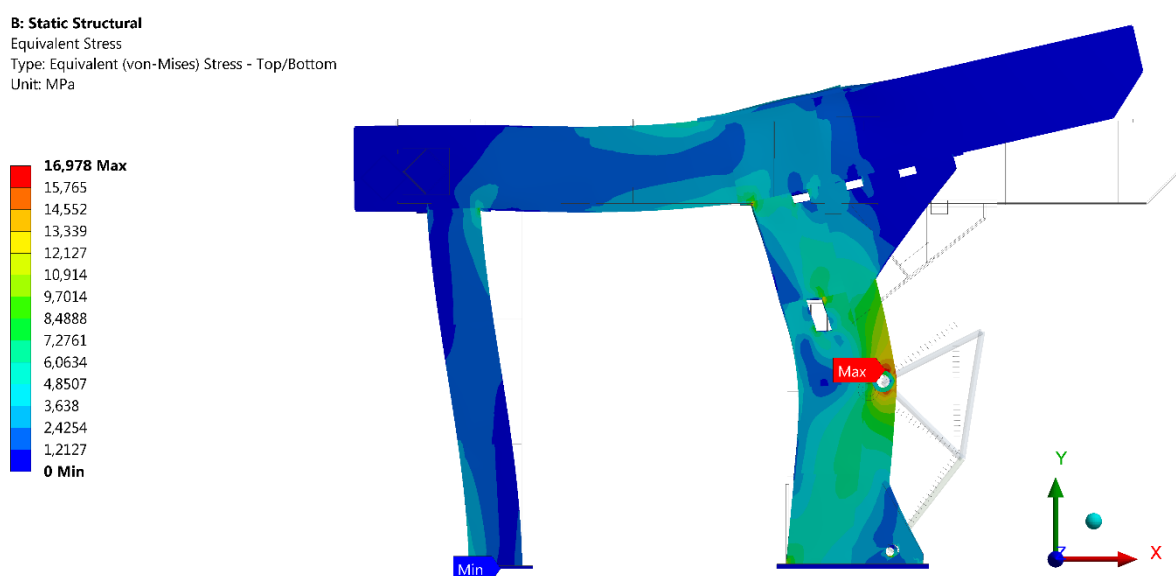
7.10. Redukované napětí při zatížení LC04

Nejvyšší redukované napětí se v případě namáhání konstrukce přitlačným mechanismem objevilo nad přechodem vyztužení otvoru pro čep přitlačného mechanismu a bočního plechu. V tomto místě dochází ke změně tloušťky ze 75 mm na 25 mm. Maximální redukované napětí zde dosahuje velikosti 18,01 MPa.



Obrázek 43 – PATRAN – Redukované napětí na konstrukci zatížené stavem LC04

V případě Ansysu vyšlo maximum ve stejném místě, ovšem místě nižší a to 16,978 MPa.



Obrázek 44 – ANSYS – Redukované napětí na konstrukci zatížené stavem LC04

8. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V úvodu kapitoly č. 5 bylo zmíněno, že primárním softwarem pro analýzu MKP bude MCS Patran. Proto pro vyhodnocení bude použito výsledků tohoto softwaru pro kombinované zatížení všech účinků LC1 až LC04. Pro vyhodnocení byla použita norma **ČSN EN 1993** zabývající se navrhováním ocelových konstrukcí pozemních a inženýrských staveb.

8.1. Stanovení návrhové únosnosti

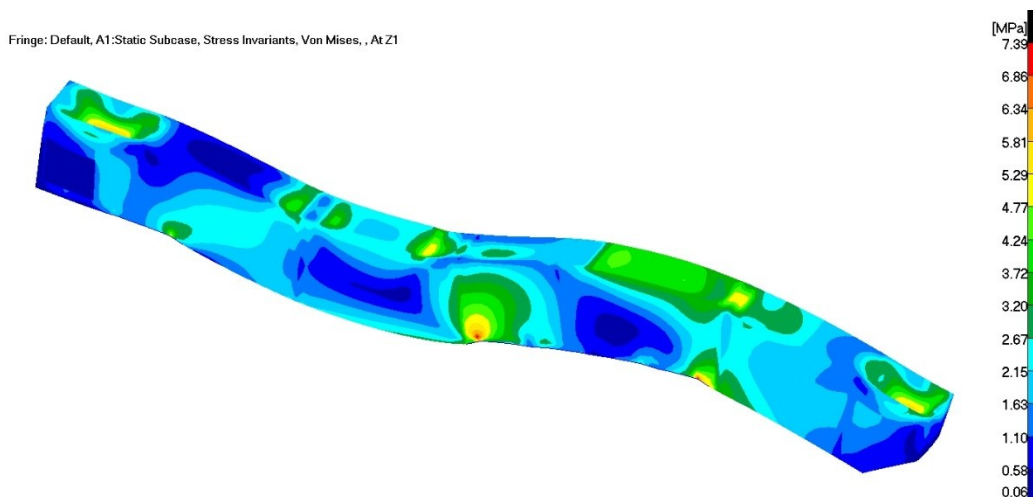
Na hodnocení statické pevnosti konstrukce se podílí globální dílčí součinitel spolehlivosti materiálu příslušící dílčí únosnosti daný normou **ČSN EN 1993-1-1**. Ten byl stanoven na $\gamma_M = 1,25$ pro konstrukci nacházející se v seizmicky klidné oblasti bez rizika možných hurikánů a jiných povětrnostních podmínek.

Návrhová únosnost se poté získá jako podíl smluvní meze kluzu materiálu $R_{p0,2}$ a součinitele spolehlivosti γ_M podle norem [1], [2] a [3].

$$R_d = \frac{R_{p0,2}}{\gamma_M} = \frac{200}{1,25} = 160 \text{ [MPa]} \quad (8.1.1)$$

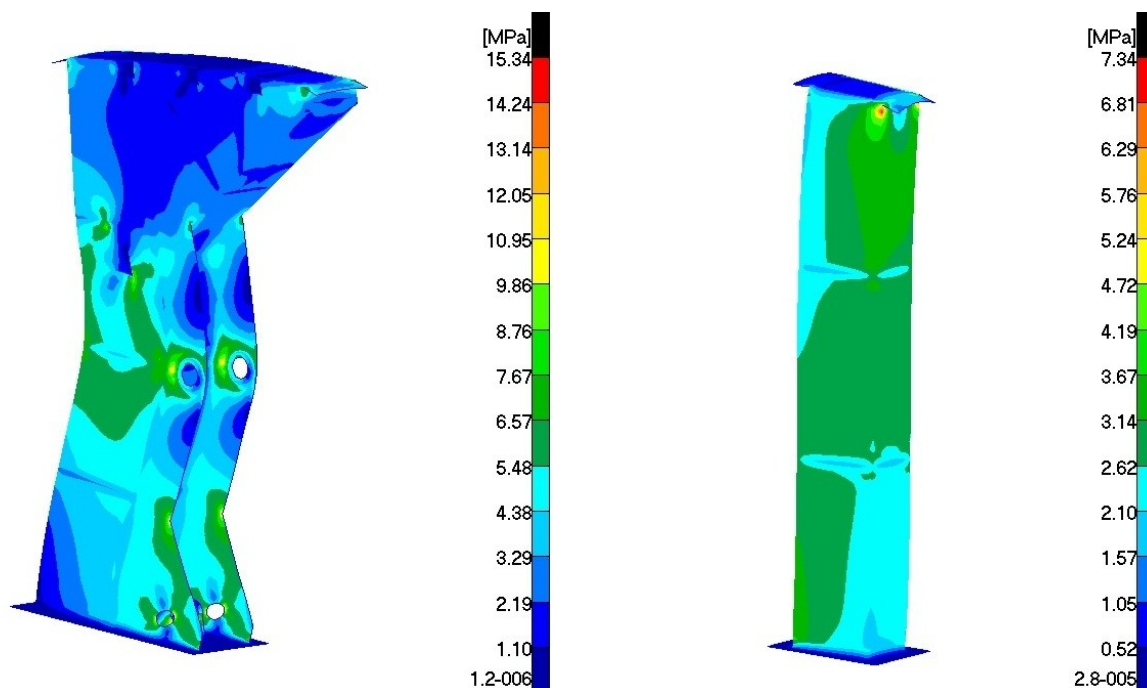
8.2. Vyhodnocení redukovaného napětí na jednotlivých dílech konstrukce

Na horizontálním nosníku dochází k maximu napětí v místě přechodu tohoto nosníku a hlavního vertikálního nosníku pod Yankee válcem. Hodnota tohoto napětí je 7,39 MPa.



Obrázek 45 – Redukované napětí na horizontální nosníku při zatížení stavby LC01 až LC04

V případě hlavního vertikálního nosníku (sloupu pod Yankee válcem) se jedná o místo již zmíněném v detailu obrázku 23. Jedná se o otvory pro uchycení hydraulického válce. Tyto otvory jsou namáhány na tlak. Jedná se o orientační hodnotu z důvodu způsobu aplikace okrajové podmínky. Pokud bychom chtěli přesnější hodnoty, musely ty se zde vytvořit objemové prvky a úloha by se řešila pomocí kontaktu. U vedlejšího vertikálního nosníku je maximální redukované napětí rovno 7,34 MPa.



Obrázek 46 – Redukované napětí na vertikálních nosnících při zatížení stavy LC01 až LC04

8.3. Výsledné hodnoty napětí a pevnostní podmínka

Pevnostní podmínka je dána jako:

$$\sigma_{red} \leq R_d \quad (8.3.1)$$

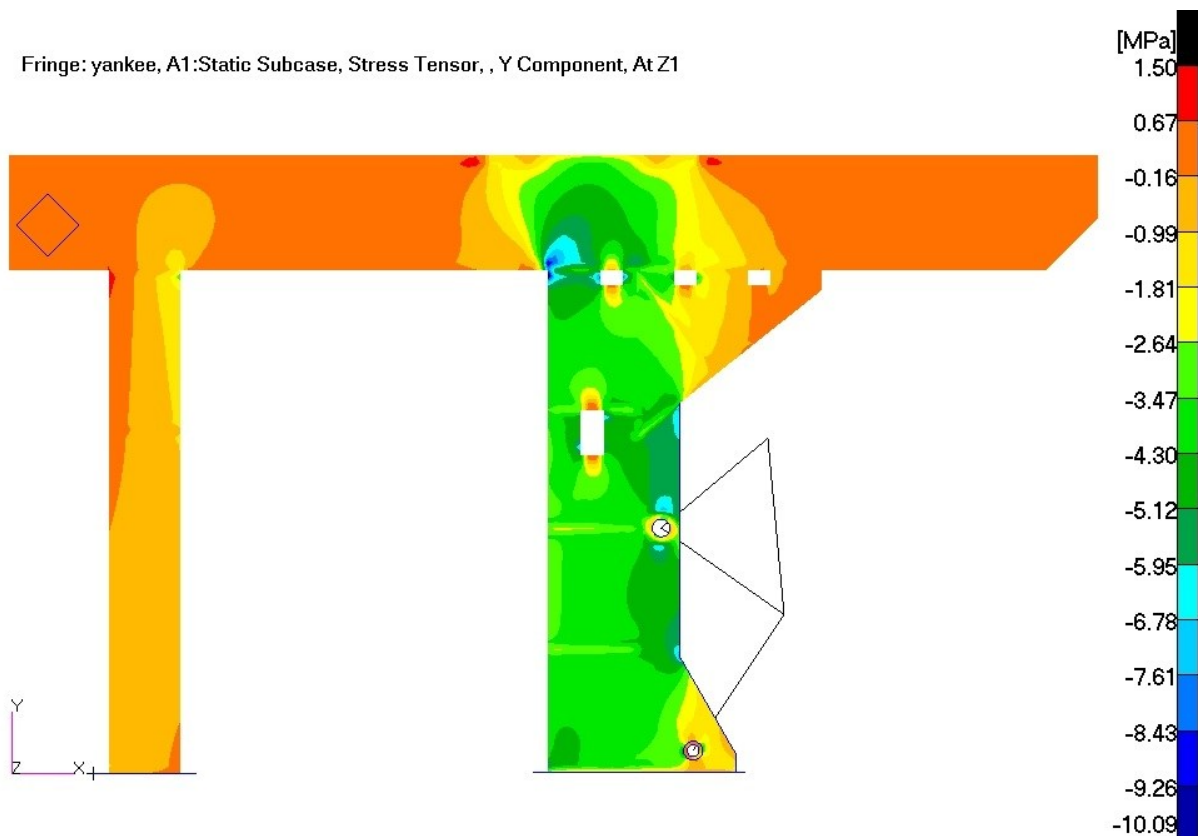
Maximální hodnoty na jednotlivých částech konstrukce jsou uvedeny v následující tabulce.

Část konstrukce	Redukované napětí σ_{red} [MPa]	Dovolená hodnota R_d [MPa]	
Sloup pod Yankee válcem	15,34	160	vyhovuje
Sloup u navíječe	7,34		vyhovuje
Podélný nosník	7,39		vyhovuje

Tabulka 8.1 – Tabulka výsledných hodnot

9. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ANALYTICKÉ METODY S MKP

V kapitole s analytickým výpočtem nám vyšel na hlavním nosném sloupu pod Yankee válcem tlak o hodnotě **6,213 MPa**. Na obrázku 47 můžeme vidět vykreslené napětí na konstrukci pro zátěžný stav LC02, kdy na konstrukci působí pouze tíha Yankee válce. Byla vykreslena složka napětí pro osu Y. Ze záporných hodnot můžeme usoudit, že se jedná opět o zatížení v tlaku. V případě analytického řešení byl průřez nosníku konstantní, ovšem v případě MKP se průřez v průběhu se mění a navíc se zde objevují otvory a výztuhy konstrukce. Proto není rozložení napětí rovnoměrné. Pokud se na modelu zaměříme na část sloupu o průřezu, který byl použit při analytickém řešení, můžeme za výsledek MKP metody pro porovnání považovat napětí pohybující se od 2,64 do 5,95 MPa.



Obrázek 47 – Složka napětí ve smětu osy Y na konstrukci

Metoda	Mód zatěžování	Hodnota napětí
Analytický	tlak	6,213 MPa
MKP	tlak	2,64 až 5,95 MPa

Tabulka 9.1 – Porovnání analytické metody s MKP

10. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala statickou pevnostní analýzou nosné konstrukce pro papírenský Yankee válec. Cílem bylo zjistit, jestli zadaná nosná konstrukce vydrží zatížení vznikající od prvků umístěných na konstrukci. Pro vyhodnocení byla použita norma ČSN EN 1993 zabývající se navrhováním ocelových konstrukcí pozemních a inženýrských staveb.

Úloha byla řešena dvěma způsoby – analyticky a pomocí MKP v softwaru MSC Patran-Nastran a Ansys Workbench. Při řešení analytickou metodou bylo provedeno zjednodušení úlohy a počítáno pouze se zatěžujícím účinkem LC02. Výsledek získaný pomocí MKP pro tento případ je přibližně o polovinu menší, jelikož analytický výpočet nezahrnuje vliv proměnlivého průřezu, otvorů a výztuh na nosníku (viz. Kapitola 9).

Výsledné průběhy posuvů a redukovaného napětí (von Mises) získané pomocí zmíněných softwarů byly mezi sebou porovnány. Průběhy těchto sledovaných veličin se výrazně neliší pro jednotlivé zátěžné stavy a jejich následnou kombinaci. Rozdíl získaných primárních výsledků neboli posuvů se liší maximálně o 5,77 % a to v případě kombinace zátěžných stavů LC01 až LC04. Tyto procentuální rozdíly ve výsledcích se dají přisoudit nestejnému vysítování modelu v těchto dvou softwarech a sítě použité při výpočtu tak nejsou totožné.

Na základě normy ČSN EN 1993 byla stanovena návrhová únosnost materiálu pro konstrukci na 160 MPa. Pro vyhodnocení byly použity výsledky získané pomocí softwaru MSC Patran, který je považován za primární software pro tuto práci. **Hodnota návrhové únosnosti nebyla překročena pro případ žádného zátěžného stavu a ani v případě jejich kombinace, konstrukce tak vyhoví požadavku normy.** Nejvyšší hodnoty 18,01 MPa dosáhlo redukované napětí v případě zátěžného stavu LC04, kdy je konstrukce namáhána přítlačným válcem. Na základě získaných hodnot redukovaných napětí pro jednotlivé zátěžné stavy a meze únosnosti můžeme říct, že konstrukce je z hlediska statické analýzy dostatečně dimenzována a má vyšší bezpečnost.

11. POUŽITÉ ZDROJE A LITERATURA

- [1] **ČSN EN 1990.** *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí.* Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004.
- [2] **ČSN EN 1993-1-1.** *Eurokód 3:: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [3] **ČSN EN 1993-2.** *Eurokód 3:: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 2: Ocelové mosty.* Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2008.
- [4] **ENTER - Edukativní program Národního technického muzea.** Papír. [Online]. [cit. 2017-5-15] Dostupné z WWW: http://www.ntm.cz/data/projekty/muzejni-pedagogika/enter_papir.pdf
- [5] **J. ROJÍČEK, M. FUSEK.** *Podklady do předmětu MKP1.* [Online]. [cit. 2017-5-15] Dostupné z WWW: <https://www.dropbox.com/sh/st48x94ucvx5lj8/AAAf1IAZDTnFEUVWUBcuYxbya/Literatura?dl=0&preview=Podklady+do+p%C5%99edm%C4%9Btu+MKP1.pdf>
- [6] **LENERT, Jiří.** *Úvod do metody konečných prvků.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1999. 80-7078-686-8.
- [7] **Papcel.** *Crescent former.* Papcel.cz [Online]. [cit. 2017-5-15] Dostupné z WWW: <http://www.papcel.cz/produkty/tissue/crescent-former/>
- [8] **Papcel.** *Konvenční tissue.* Papcel.cz [Online]. [cit. 2017-5-15] Dostupné z WWW: <http://www.papcel.cz/produkty/tissue/konvencni-tissue/>
- [9] **Papcel.** *Vysokokapacitní zákryty.* Papcel.cz [Online]. [cit. 2017-5-15] Dostupné z WWW: <http://www.papcel.cz/produkty/tissue/vysokokapacitni-zakryty/>
- [10] **R. HALAMA, L. ADÁMKOVÁ, F. FOJTÍK, K. FRYDRÝŠEK, M. ŠOFER, J. ROJÍČEK, M. FUSEK FUSEK.** *Pružnost a pevnost.* [Online] 2011. [cit. 2017-5-15] Dostupné z WWW: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/pruznost_a_pevnost.pdf
- [11] **Úvod do MKP – přednášky** [Online]. [cit. 2017-5-15] Dostupné z WWW: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/UvodDoMKP_prednasky.pdf

PŘÍLOHY

Příloha A – Výkresová dokumentace

V seznamu níže je uvedena výkresová dokumentace konstrukce použitá při vypracování této bakalářské práce. Jedná se o duševní vlastnictví firmy Papcel. V případě zájmu o nahlédnutí do této dokumentace se proto obraťte na tuto firmu.

- 3280.409.000_C – YANKEE STRUCTURE
- 3280.409.100_C – FS MAIN BEAM
- 3280.409.300_B – FS MAIN COLUMN
- 3280.409.500 – FS COLUMN
- 3280.409.700 – CROSSBEAM
- T73778_0 – HOOD DIMENSIONS AND TRANSPORT

Příloha B – Elektronický nosič DVD

- Text bakalářské práce
- Výpočetní soubor analytického řešení v programu MathCad
 - Analytický výpočet.mcd